ISSN 2078-4481

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХЕРСОНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ВІСНИК

ХЕРСОНСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

1(92)

Частина 1

Рекомендовано до друку Вченою радою
Херсонського національного технічного університету
(протокол № 7 від 25.02.2025 року)

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України
категорії «Б» за економічними науками, спец. – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 242
(Наказ МОН України від 17.03.2020 № 409),
281 (Наказ МОН України від 29.06.2021 № 735);
та за технічними науками, спец. – 121, 122, 123, 125, 126, 131, 132, 133, 151, 274, 275
(Наказ МОН України від 02.07.2020 № 886)
та спец. 141, 161, 182 (Наказ МОН України від 24.09.2020 № 1188)

Журнал включено до наукометричних баз, електронних бібліотек та репозитаріїв:
GoogleScholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Редакційна колегія

Головний редактор
Литвиненко В. І.
д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук,
заслужений діяч науки і техніки України

Заступник головного редактора
Сарібєкова Ю. Г.
д.т.н., професор

Шерстюк В. Г.
д.т.н., професор, проректор з навчальної роботи

Відповідальний секретар
Лур'є І. А.
к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Члени редакційної колегії

Баганов Є. О.	к.т.н., доцент
Березовський Ю. В.	д.т.н., доцент
Бойко Г. А.	к.т.н., доцент
Вороненко М. О.	к.т.н., доцент
Гончар О. І.	д.е.н., професор
Горбачов П. Ф.	д.т.н., професор
Дімітрова В.	д.н., доцент
Джерелюк Ю. О.	д.е.н., професор
Євтушенко В. В.	к.т.н., доцент
Жарікова М. В.	д.т.н., професор
Зубкова К. В.	к.т.н., доцент
Корчевська Л. О.	д.е.н., професор
Кузьміна Т. О.	д.т.н., професор
Куник О. М.	к.т.н., доцент
Луб'яний П. В.	к.т.н., доцент
Наумов О. Б.	д.е.н., професор
Олійник Н. М.	к.т.н., доцент
Плющ Р. М.	д.держ.упр., професор
Половцев О. В.	д.держ.упр., к.т.н., професор
Рудакова Г. В.	д.т.н., професор
Русанов С. А.	к.т.н., доцент
Савін С. Ю.	д.е.н., доцент
Салєба Л. В.	к.т.н., доцент
Семешко О. Я.	д.т.н., професор
Сідельникова Л. П.	д.е.н., професор
Smolarz A. (Польща)	dr.hab.inz.
Стоянова О. В.	к.т.н., доцент
Топалова Е. Х.	к.держ.упр., доцент
Філіппова В. Д.	д.держ.упр., професор
Хрущ Н. А.	д.е.н., професор
Чепелюк О. В.	д.т.н., професор
Шандова Н. В.	д.е.н., професор
Шарко О. В.	д.т.н., професор
Шарко М. В.	д.е.н., професор
Шевченко І. І.	д.т.н., професор

ISSN 2078-4481

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE
KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

VISNYK

OF KHERSON NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY

1(92)

Part 1

Recommended for publication by the Academic Council
of Kherson National Technical University
(Minutes № 7 on 25th February 2025)

The journal is included in the List of Scientific Professional Editions of Ukraine Category “B”
in economics, special. – 051, 071, 072, 073, 075, 076, 242
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 17.03.2020, № 409),
281 (Ukraine Education and Science Ministry Order dated 29.06.2021, № 735);
and technical sciences, special. – 121, 122, 123, 125, 126, 131, 132, 133, 151, 274, 275
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 02.07.2020, № 886)
and special. 141, 161, 182
(Ukraine Education and Science Ministry Order dated 24.09.2020, № 1188)
The journal is included in the scientometric bases, electronic libraries and repositories:
Google Scholar, Crossref, National Library of Ukraine (Vernadsky)

Publishing House
“Helvetica”
2025

Editorial Board

Editor-in-Chief
Litvinenko V. I.
Doctor of Engineering Science, Professor, Head of the Department of Informatics and Computer Science, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine

Deputy Editor-in-Chief
Saribekova Yu. G.
Doctor of Engineering Science, Professor

Sherstiuk V. H.
DSc (Engineering), Professor, Vice-Rector for Academic Affairs

Executive Secretary
Lurie I. Yu.
PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Educational and Methodical Department, Associate Professor of the Department of Informatics and Computer Sciences

Members of Editorial Board

Baganov Ye. O.	Ph.D., Associate Professor
Berezovsky Yu. V.	Doctor of Engineering Science, Associate Professor
Boiko H. A.	Ph.D., Associate Professor
Voronenko M. O.	Ph.D., Associate Professor
Honchar O. I.	Doctor of Economic Sciences, Professor
Horbachov P. F.	Doctor of Economics, Professor
Dimitrova V. Ya. (Bulgaria)	Ph.D., Associate Professor
Dzhereliuk Yu. A.	Doctor of Economics, Professor
Yevtushenko V. V.	Ph.D., Associate Professor
Zharikova M. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Zubkova K. V.	Ph.D., Associate Professor
Korchevska L. A.	Doctor of Economics, Professor
Kuzmina T. O.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Kunyk O. N.	Ph.D., Associate Professor
Lubianyi P. V.	Ph.D., Associate Professor
Naumov O. B.	Doctor of Economics, Professor
Oliinyk N. M.	Ph.D., Associate Professor
Pliushch R. M.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Polovtsev O. V.	Doctor of Sciences in Public Administration, Professor
Rudakova H. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Rusanov S. A.	Ph.D., Associate Professor
Savin S. Yu.	Doctor of Economics, Associate Professor
Saleba L. V.	Ph.D., Associate Professor
Semeshko O. Ya.	Doctor of Engineering Science, Professor
Sidelnykova L. P.	Doctor of Economics, Professor
Smolarz A. (Poland)	Ph.D., Associate Professor
Stoianova O. V.	Ph.D., Associate Professor
Topalova E. K.	Ph.D., Associate Professor
Filippova V. D.	Doctor of Science in Public Administration, Professor
Khrushch N. A.	Doctor of Economics, Professor
Chepeliuk O. V.	Doctor of Technical Sciences, Professor
Shandova N. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko M. V.	Doctor of Economics, Professor
Sharko O. V.	Doctor of Engineering Science, Professor
Shevchenko I. I.	Doctor of Technical Sciences, Professor

ЗМІСТ

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

М. В. Андріянова, Д. М. Приходько, В. О. Головенко, О. В. Черваков, В. В. Лобода, В. В. Прокопенко. Борвмісні дифенілолпропанформальдегідні смоли та покриття на їх основі……9

В. І. Бессарабов, О. В. Іщенко, О. О. Чорний, В. Г. Хоменко, О. А. Андереева. Застосування технологій електроформування та відцентрового формування волокон для створення високорозчинних твердих дисперсних систем із вмістом активних фармацевтичних інгредієнтів……15

В. М. Болдовський. Оцінка експлуатаційних властивостей моторної оливи за термоокислювальною стабільністю……26

Р. О. Бондар, І. А. Гришко. Установка для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів……30

Л. В. Вахоніна, В. А. Мардзявко, А. Ю. Руденко. Резонансний генератор імпульсів на основі діода……39

С. В. Гайдукевич, Н. П. Семенова. Сучасні тенденції удосконалення технологічних процесів у тваринництві та птахівництві……49

О. В. Головіна, Ю. Ф. Холодний, О. П. Строков, В. О. Жовтобрюх. Дослідження впливу якості діагностики і ремонту електронних систем на подальшу технічну експлуатацію автомобіля……57

Г. В. Григорчук, Л. І. Григорчук, Н. А. Гловин. Застосування теорії ймовірностей для аналізу та оптимізації бізнес-процесів……63

Д. О. Дмитрієв, С. Г. Катріч. Вплив температурно-технологічних умов на параметри якості в адитивному виробництві……72

А. В. Касьян, О. С. Галецький. Розробка математичної моделі пневматичного позиційного приводу……79

О. І. Клюєв, І. А. Шатохіна, С. А. Русанов. Конструктивна реалізація стендів для випробувань теплоакумуляторів фазового переходу для передпускової підготовки двигунів внутрішнього згоряння автомобілів……89

Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник. Розробка системи спрямованого вибору технології досягнення необхідної якості поверхні деталей насосного обладнання АЕС при їх виготовленні та ремонті……96

S. I. Kuznietsov, O. O. Venher, V. M. Bezpalchenko, O. O. Semenchenko, Ye. S. Ivkina. Classification of methods for sanitary purification of gases from nitrogen oxides……105

О. Ф. Кузькін, І. М. Райда, В. Е. Трушевський. Статистичний аналіз контактів пасажирів громадського транспорту на міських маршрутах……115

О. Б. Кунгурцев, П. М. Гузар, Т. О. Новікова, Т. О. Федянін, Б. В. Чебаненко. Комп'ютерні моделі для гри у снукер і підказок……123

В. М. Кучер, Ю. Є. Скнар, І. В. Скнар, Т. Є. Бутиріна. Анодне розчинення олова і свинцю в метансульфонатних розчинах……130

С. В. Лапковський, В. К. Фролов, В. О. Кравець, О. М. Кравець, Л. М. Данилова, В. П. Приходько. Використання принципу дії фрактальних лещат при проєктуванні адаптивних захватних пристроїв……137

Д. О. Личов, Е. Г. Сафаров, Т. В. Петренко, Р. Е. Сафаров. Особливості електрообладнання для зарядних станцій вантажного транспорту……144

О. В. Лінючева, О. С. Бутенко. Екологічно безпечний сенсор розчиненого у воді кисню з додатковим цинковим електродом для поновлення функціональності мідного анода……150

I. Sh. Nevliudov, V. V. Yevsieyev, D. V. Gurin. Mathematical model of block process planning in systems of allocation of task between people and collaborative robots in the framework of Industries 5.0……157

О. В. Панишева, В. В. Федоренко, В. В. Яременко, О. О. Чорний, С. М. Гуреєва. Ризикоорієнтована стратегія розробки складу та технології твердих дисперсних систем……164

Д. О. Петраченко. Дослідження кількості циклів обрушування насіння промислових конопель у відцентровому механізмі……178

В. О. Подолян. Технології штучного інтелекту в автоматизації транспортних процесів……184

Л. А. Проц, Ю. І. Фордзюн, Є. М. Лютий. Інтеграція теплотехнічних процесів у проєктування енергоефективних машинобудівних систем……190

V. P. Rashkivskyi, M. O. Prystailo, B. M. Fedyshyn, A. S. Besida. Development of a physical model and determination of similarity coefficients of a spatially oriented knife of a bulldozer blade……198

О. В. Рясна, О. Ю. Савойський, В. О. Кравченко, В. М. Козін, О. Ю. Юрченко. Скалярний метод керування асинхронних електроприводів в системі водопостачання……204
О. Ю. Савойський, О. В. Таценко, О. О. Соларьов, Ю. І. Семірненко, О. А. Саржанов, Т. П. Волошко. До питання обгрунтування типів автотранспортних засобів для вантажоперевезень у транспортних технологіях……212
Л. В. Салєба. Розробка складу косметичної маски для обличчя……219
О. В. Степанов, І. Ю. Кобзар. Формалізація процесів технічної експлуатації вантажного автотранспорту……224
О. В. Степанов, В. М. Мінаков. Оцінка працездатності вантажного автотранспорту……230
О. В. Тарасенко, Т. В. Харченко, Г. О. Лебідь. Розвиток пасажирського транспорту в умовах цифровізації: економічні та інфраструктурні аспекти……235
В. О. Ткач, О. А. Войтович. Моніторинг якості освіти в умовах дистанційного навчання……244
D. P. Thorzhevsky, A. S. Zabaluev, D. Yu. Ushchapovskyi, V. I. Vorobyova, G. S. Vasyliev, O. V. Linyucheva. The influence of electrolyte composition on the corrosion resistance of nickel-based metal-resistive coatings……249
О. М. Фролов, С. Р. Сєліверстова. Визначення оптимальних режимів дорозгону фосфору при виробництві дрейфових *n-p-n* транзисторів……257
Л. А. Фролова, Д. О. Родін. Структурні, магнітні та фотокаталітичні властивості фериту $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$……263
Л. А. Хрокало, В. І. Воробйова, О. О. Сумовська, Є. О. Анголенко. Синтез наносистеми на основі тетрахлораурипової кислоти та слизу равлика *Cornu aspersum,* включення її до складу косметичних патчів та клінічна оцінка ефективності……269
С. П. Шаповал, С. Й. Мисак. Досліження теплової ефективності гібридного теплового-фотоелектричного геліоколектора……278
В. В. Шевчук, В. В. Кучанський, В. І. Кошман, Л. Р. Сабарно, І. М. Севастюк. Аналіз характеристик електромагнітного реле до провалів напруги, стрибку фазового кута та точок початку та закінчення провалів……285
О. Г. Шибаєв. Формалізація рішень щодо управління морськими перевезеннями у транспортній мережі……291
О. Ю. Юрченко, Т. П. Волошко. Функціонування пластикових манекенів пішоходів в рамках привертання уваги водіїв при русі на пішохідних переходах……296

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

А. П. Бойко, М. В. Шумаков. Розробка програмного забезпечення симулювання польоту безпілотних літальних апаратів……303
А. Г. Данилкович, О. О. Романюк, Н. В. Мережко. Структурування шкіряного напівфабрикату, отриманого з кінської стровини……309
А. В. Євтушенко, Г. А. Бойко. Сучасний стан первинної переробки луб'яних культур……316
В. В. Євтушенко, О. В. Фурса. Вимоги до збирання льону олійного для подальшої переробки на волокно……321
С. М. Коб'яков, А. Ю. Лисих. Обробка текстильного матеріалу покривною композицією……325
В. В. Листван. Діарилетилени як органічні люмінофори: простий синтез за реакцією Віттіга……331
В. В. Мица, М. Л. Рябчиков. Цифрові методи 3D прототипування при створенні розумних текстильних матеріалів з керованими параметрами……336
М. Є. Рацук, Т. А. Юрова, Д. А. Яценко. Одержання бальзамів для губ із сонцезахисним ефектом……344

CONTENTS

ENGINEERING SCIENCES

M. V. Andriianova, D. M. Prykhodko, V. O. Holovenko, O. V. Chervakov, V. V. Loboda, V. V. Prokopenko. Boron-containing bisphenol-a formaldehyde resins and coatings based on them……9

V. I. Bessarabov, O. V. Ishchenko, O. O. Chornyi, V. G. Khomenko, O. A. Andreyeva. Application of electrospinning and centrifugal fibre formation technologies to create highly soluble solid dispersed systems containing active pharmaceutical ingredients……15

V. M. Boldovskyi. Evaluation of motor oil performance properties by thermal oxidation stability……26

R. O. Bondar, I. A. Hryshko. Quipment for cavitation hydrogenation of heavy petroleum products……30

L. V. Vakhonina, V. A. Mardziavko, A. Yu. Rudenko. Diode-based resonant pulse generator……39

S. V. Haidukevych, N. P. Semenova. Modern trends in improving technological processes in livestock and poultry……49

O. V. Holovina, Yu. F. Kholodnyi, O. P. Strokov, V. O. Zhovtobryukh. Investigation of the influence of the quality of diagnostics and repair of electronic systems on the further technical operation of the car……57

G. V. Grygorchuk, L. I. Grygorchuk, N. A. Glovin. Using probability theory to analyze and optimize business processes……63

D. O. Dmytriiev, S. G. Katrich. The influence of temperature-technological conditions on quality parameters in additive manufacturing……72

A. V. Kasian, O. S. Haletskii. Development of a mathematical model of a pneumatic position drive……79

O. I. Kliuiev, I. A. Shatokhina, S. A. Rusanov. Design implementation of test stands for phase change thermal energy storage systems for pre-start preparation of internal combustion engines in automobiles……89

I. V. Konoplianchenko, N. V. Tarelnyk. Development of a directed choice system for the required quality achieving technology of NPP pumping equipment surface parts during their manufacturing and repair……96

S. I. Kuznietsov, O. O. Venher, V. M. Bezpalchenko, O. O. Semenchenko, Ye. S. Ivkina. Classification of methods for sanitary purification of gases from nitrogen oxides……105

O. F. Kuzkin, I. M. Raida, V. E. Trushevskyi. Statistical analysis of public transport passenger contacts on urban routes……115

O. B. Kungurtsev, P. M. Guzar, T. O. Novikova, T. S. Fedianin, B. V. Chebanenko. Computer models for snooker game and tip……123

V. M. Kucher, Yu. E. Sknar, I. V. Sknar, T. E. Butyrina. Anode dissolving tin and lead in methanesulfonate solutions……130

S. V. Lapkovsky, V. K. Frolov, V. O. Kravets, O. M. Kravets, L. M. Danylova, V. P. Prykhodko. Using the operating principle of fractal vice in the design of adaptive grippers……137

D. O. Lychov, E. G. Safarov, T. V. Petrenko, R. E. Safarov. Features of electrical equipment for freight transport charging stations……144

O. V. Linyucheva, O. S. Butenko. Ecologically safe dissolved oxygen sensor with an additional zinc electrode to restore the functionality of the copper anode……150

I. Sh. Nevliudov, V. V. Yevsieyev, D. V. Gurin. Mathematical model of block process planning in systems of allocation of task between people and collaborative robots in the framework of Industries 5.0……157

O. V. Panysheva, V. V. Fedorenko, V. V. Yaremenko, O. O. Chornyi, S. M. Gureyeva. Risk-oriented strategy for the development of the composition and technology of solid dispersion systems……164

D. O. Petrachenko. Study of the number of shelling cycles of industrial hemp seeds in a centrifugal mechanism……178

V. O. Podolian. Artificial intelligence technologies in automation of transport processes……184

L. A. Prots, Yu. I. Fordzjyn, Ye. M. Lyutyi. Integration of thermal engineering processes into the design of energy-efficient mechanical engineering systems……190

V. P. Rashkivskyi, M. O. Prystailo, B. M. Fedyshyn, A. S. Besida. Development of a physical model and determination of similarity coefficients of a spatially oriented knife of a bulldozer blade……198

O. V. Ryasnaya, O. Yu. Savoyskyi, V. O. Kravchenko, V. M. Kozin, O. Yu. Yurchenko. Scalar control method of asynchronous electric drives in water supply system……204

O. Yu. Savoiskyi, O. V. Tatsenko, O. O. Solarov, Yu. I. Semirnenko, O. A. Sarzhanov, T. P. Voloshko. On the justification of vehicle types for freight transportation in transport technologies……212

L. V. Saleba. Composition development of the cosmetic face mask……219
O. V. Stepanov, I. Yu. Kobzar. Formalization of the processes of technical operation of freight vehicles……224
O. V. Stepanov, V. M. Minakov. Assessment of truck performance……230
O. V. Tarasenko, T. V. Kharchenko, H. O. Lebid. Development of passenger transport in the conditions of digitalization: economic and infrastructure aspects……235
V. O. Tkach. O. A. Voitovych. Monitoring of the quality of education in the conditions distance education……244
D. P. Thorzhevsky, A. S. Zabaluev, D. Yu. Ushchapovskyi, V. I. Vorobyova, G. S. Vasyliev, O. V. Linyucheva. The influence of electrolyte composition on the corrosion resistance of nickel-based metal-resistive coatings……249
A. N. Frolov, S. R. Seliverstova. Determination of optimum modes for phosphorus additional distribution in the production of drift *n-p-n* transistors……257
L. A. Frolova, D. O. Rodin. Structural, magnetic and photocatalytic properties of ferrite $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$……263
L. A. Khrokalo, V. I. Vorobyova, O. O. Sumovska, Ye. O. Anholenko. Nanosystem synthesis based on tetrachloroauric acid and *Cornu aspersum* snail mucus, it's incorporation into cosmetic patches and clinical evaluation of efficacy……269
S. P. Shapoval, S. Y. Mysak. Investigation of the thermal efficiency of a hybrid thermal-photovoltaic solar collector……278
V. V. Shevchuk, V. V. Kuchansky, V. I. Koshman, L. R. Sabarno, I. M. Sevastyuk. Analysis of the characteristics of the electromagnetic relay to voltage falls, phase angle jumps, and the points of beginning and end of falls……285
O. G. Shibayev. Formalization of decisions regarding maritime transportation management in the transport network……291
O. Yu. Yurchenko, T. P. Voloshko. Functioning of plastic pedestrians mannequins in the framework of attracting the attention of drivers when driving at pedestrian crossings……296

THE TECHNOLOGY OF LIGHT AND FOOD INDUSTRY

A. P. Boiko, M. V. Shumakov. Development of software for simulating the flight of unmanned aerial vehicles……303
A. G. Danylkovych, O. O. Romaniuk, N. V. Merezhko. Structuring of leather semi-finished products obtained from horse foot……309
A. V. Yevtushenko, H. A. Boiko. Current status of primary processing of bas crops……316
V. V. Yevtushenko, O. V. Fursa. Requirements for harvesting oil flax for further fiber processing……321
S. M. Kobyakov, A. Yu. Lysykh. Treatment of textile material with coating composition……325
V. V. Lystvan. Diaryl ethylenes as organic luminophores: simply synthesis via Wittig reaction……331
V. V. Mytsa, M. L. Riabchykov. Digital 3D prototyping methods for creating smart textile materials with controllable parameters……336
M. E. Ratsuk, T. A. Yurova, D. A. Yatsenko. Production of lip balms with sun protection effect……344

ІНЖЕНЕРНІ НАУКИ

УДК 667.6, 665.5, 633.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.1

М. В. АНДРІЯНОВА
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри технологій природних та синтетичних полімерів, жирів
та харчової продукції
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0001-5216-0995

Д. М. ПРИХОДЬКО
магістр з дипломом кафедри вагонів та вагонного господарства
Навчально-науковий інститут «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0007-0932-7527

В. О. ГОЛОВЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0003-1018-3966

О. В. ЧЕРВАКОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологій природних та синтетичних полімерів, жирів
та харчової продукції
Навчально-науковий інститут «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-1631-3592

В. В. ЛОБОДА
магістр з дипломом кафедри вагонів та вагонного господарства
Навчально-науковий інститут «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0009-3790-9959

В. В. ПРОКОПЕНКО
магістр з дипломом кафедри аерогідромеханіки та енергомасопереносу
Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара
ORCID: 0009-0009-6755-6138

БОРВМІСНІ ДИФЕНІЛОЛПРОПАНФОРМАЛЬДЕГІДНІ СМОЛИ ТА ПОКРИТТЯ НА ЇХ ОСНОВІ

Сучасна хімічна промисловість активно розвивається у напрямку створення нових матеріалів із покращеними фізико-хімічними властивостями. Дифенілолпропанформальдегідні смоли є одними з найпоширеніших термореактивних полімерів завдяки їхній здатності утворювати тривимірну сітку з високими механічними характеристиками та стійкістю до агресивних середовищ. Їх отримують шляхом конденсації дифенілолпропану (бісфенолу А) з формальдегідом у присутності кислотних або лужних каталізаторів. Додавання окремих елементів, таких як бор, кремній і фосфор, в основну основу термореактивної смоли є новою стратегією для отримання спеціальних високоефективних смол, що призводить до вищих механічних властивостей та до підвищеної термоокислювальної стабільності порівняно зі звичайними фенолоформальдегідними смолами. Одним із таких перспективних напрямків є синтез борвмісних смол на основі дифенілолпропанформальдегідних полімерів, які знаходять широке застосування в різних галузях промисловості, зокрема в лакофарбовій, електротехнічній, адгезійній та теплоізоляційній сферах. Таким чином, дослідження процесів синтезу борвмісних дифенілолпропанформаль-

дегідних смол є актуальним завданням, оскільки воно сприяє розробці нових матеріалів з покращеними фізико-хімічними та експлуатаційними характеристиками.

У роботі розглянуто основні методи синтезу, механізми взаємодії борвмісних сполук з полімерною основою, а також вплив бору на кінцеві властивості отриманих смол та покриттів на їх основі. Встановлено, що покриття на основі борвмісних бутанолізованих дифенілолпропан-формальдегідних олігомерів, модифікованих жирами рослинного походження мають кращі показники еластичності та міцності при ударі, а також термічну стабільність до 250–260 °С,що є більшою, ніж для подібних дифенілолпропанформальдегідних смол без бору.

Ключові слова: *дифенілолпропан, модифікована фенольна смола, захисне покриття.*

M. V. ANDRIIANOVA
PhD of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-5216-0995

D. M. PRYKHODKO
Magister at the Department of Wagons and Carriage Economy
Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0009-0007-0932-7527

V. O. HOLOVENKO
PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technologies Fuels, Polymeric and Polygraphic Materials
Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0003-1018-3966

O. V. CHERVAKOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Natural and Synthetic Polymers, Fats and Food Products
Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-1631-3592

V. V. LOBODA
Magister at the Department of Wagons and Carriage Economy
Educational and Scientific Institute "Ukrainian State University of Chemical Technology" of Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0009-0009-3790-9959

V. V. PROKOPENKO
Magister at the Department of Aero Hydro Mechanics and Energy and Mass Transfer
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID: 0009-0009-6755-6138

BORON-CONTAINING BISPHENOL-A FORMALDEHYDE RESINS AND COATINGS BASED ON THEM

The modern chemical industry is actively developing towards the creation of new materials with improved physicochemical properties. Diphenylolpropaneformaldehyde resins are one of the most common thermosetting polymers due to their ability to form a three-dimensional network with high mechanical characteristics and resistance to aggressive environments. They are obtained by condensation of diphenylolpropane (bisphenol A) with formaldehyde in the presence of acid or alkaline catalysts. The addition of individual elements, such as boron, silicon and phosphorus, to the main base of the thermosetting resin is a new strategy for obtaining special high-performance resins, which leads to higher mechanical properties and increased thermo-oxidative stability compared to conventional phenol-formaldehyde resins. One of such promising areas is the synthesis of boron-containing resins based on diphenylolpropaneformaldehyde polymers,

which are widely used in various industries, in particular in the paint and varnish, electrical, adhesive and thermal insulation sectors. Thus, the study of the synthesis processes of boron-containing diphenylolpropaneformaldehyde resins is an urgent task, since it contributes to the development of new materials with improved physicochemical and operational characteristics.

The paper considers the main synthesis methods, mechanisms of interaction of boron-containing compounds with a polymer base, as well as the influence of boron on the final properties of the obtained resins and coatings based on them. It has been established that coatings based on boron-containing butanolized diphenylolpropane-formaldehyde oligomers modified with vegetable fats have better elasticity and impact strength, as well as thermal stability up to 250–260 °C, which is greater than for similar diphenylolpropane-formaldehyde resins without boron.

Key words: *diphenylolpropane, modified phenolic resin, protective coating.*

Постановка проблеми

Полімери на основі борної кислоти і фенолів мають ряд цінних властивостей: гарну адгезію до скла, металу, дереву та інших матеріалів. Вони зберігають високі характеристики при підвищених (понад 200 °С) температурах і використовуються в якості самостійних термостійких зв'язуючих, що застосовуються як компоненти композиційних матеріалів, в якості добавок, з метою надання матеріалам підвищених термічних і фізико-механічних характеристик. Адже додавання окремих елементів, таких як бор, кремній і фосфор, в основу термореактивної смоли є новою стратегією для отримання спеціальних високоефективних смол, що призводить до вищих механічних властивостей, уникаючи недоліків простого додавання наповнювачів, що призводить до підвищеної термоокислювальної стабільності порівняно зі звичайними фенолоформальдегідними смолами [1]. Інтерес до даного класу полімерів викликаний широкою областю їх застосування, наприклад, в якості самостійних термостійких зв'язуючих; компонентів композиційних матеріалів, в тому числі і склопластиків; фрикційних матеріалів, наповнених мінеральними наповнювачами; добавок, які надають матеріалами підвищену термостійкість і забезпечують підвищення фізико механічних характеристик останніх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Існуючі методи синтезу борвмісних полімерів на основі борної кислоти, фенолу, резорцину, бісфенолу А і формальдегіду (параформ, триоксан) мають ряд недоліків: приділяється недостатня увага синтезу мономерів і їх очищенню. Більшість методів спрямовані на вивчення реакції поліконденсації арилборатів при різному співвідношенні фенолу і борної кислоти, що призводить до синтезу сумішей різних полімерів і, як наслідок, до утруднення встановлення структури останніх, а також до значної зміни властивостей полімерів в залежності від якості вихідних продуктів, режимів синтезу та глибини протікання поліконденсації [2–4]. Дослідження носять фрагментарний характер і не дозволяють прогнозувати можливість практичного застосування борвмістких полімерів. Крім того, відомості про структуру полімерів в опублікованих роботах часто не носять переконливого характеру. У той же час недостатньо вивчення термостійкість цих полімерів.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є синтез борвмісних дифенілолпропанформальдегідних смол і отримання на їх основі термостійких покриттів з гарними фізико-механічними та антикорозійними властивостями.

Викладення основного матеріалу дослідження

Борвмісні дифенілолпропанформальдегідні смоли отримували в кілька стадій. На першій стадії було отримано поліефір поліетерефікацією борної кислоти з дифенілолпропаном в о-ксилолі при температурі 130 °С протягом однієї години, при азеотропній відгонці води. Після розчинник відганяли і досушували отриманий ефір в вакуумі. В залежності від співвідношення вихідних компонентів дифенілолпропану і борної кислоти були отримані ди- і триефіри бісфенолу А и борної кислоти (рис. 1).

На другому етапі проведення синтезу, при молярному співвідношенні ефіру бісфенолу А і формальдегід 1:3 в лужному середовищі, з виходом 75 % були отримані метилольні похідні бороргані́чного ефіру дифенілолпропану і формальдегіду (рис. 2).

На наступному етапі була проведена реакція етерифікації отриманих метилольних похідних бутиловим спиртом у співвідношенні 2:1. Реакцію етерифікації проводили в лужному середовищі при температурі 90–95 °С (рис. 3).

На заключному етапі в синтезі ББФС при ретельному перемішуванні і температурі 100–105 °С додавали розрахункову кількість (0,5–5 мас.%) соняшникової олії. Отримували прозорі світло-жовті розчини ББФС в бутиловому спирті. Таким чином були отримані бутанолізована борвмісна дифенілолпропанформальдегідна смола на основі формаліну (ББФС-1) та параформу (ББФС-2), які при кімнатній температурі утворюють безбарвні покриття, фізико-механічних властивості показники яких занесені до табл. 1.

Отримані покриття порівнювали з раніше отриманими покриттями з бутанолізованих дифенілолпропан-формальдегіднх олігомерів на основі формаліну, модифікованими соняшниковою олією (БДФО-1) та бутанолізованих дифенілолпропан-формальдегіднх олігомерів на основі параформу, модифікованими соняшниковою олією (БДФО-2) [5].

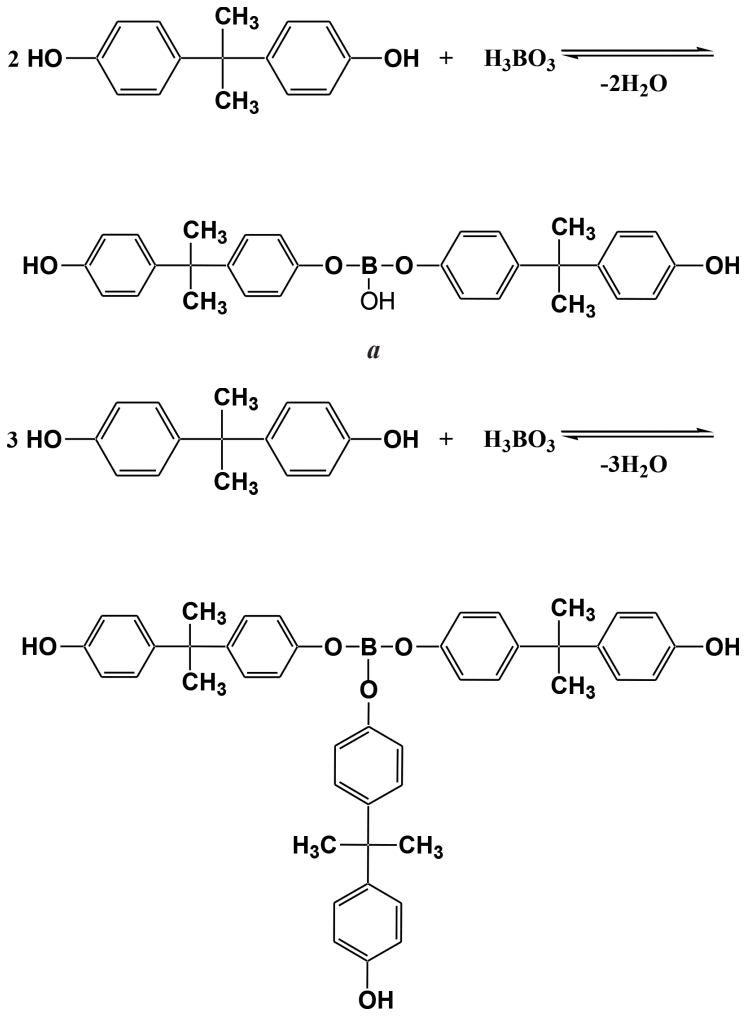


Рис. 1. Принципова схема отримання ди- (*а*) і три- (*б*) ефіру бісфенолу А і борної кислоти

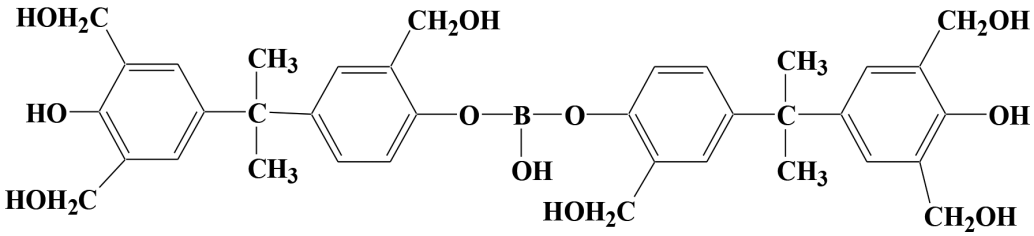


Рис. 2. Принципова хімічна будова метилольних похідних диефіру бісфенолу А і борної кислоти

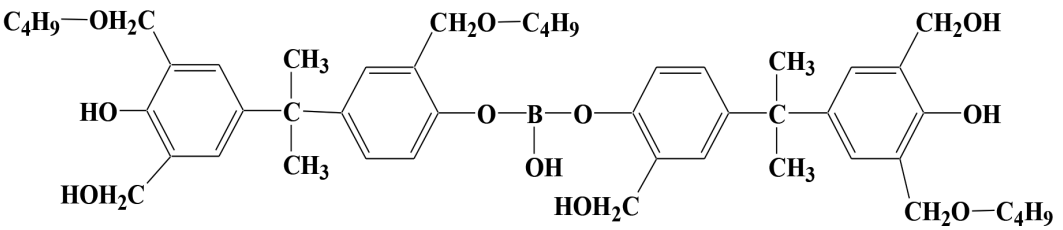


Рис. 3. Принципова хімічна будова бутанолізованих продуктів конденсації диефіру бісфенолу А і борної кислоти з формальдегідом (ББФС)

Таблиця 1

Фізико-механічні показники отриманих смол

№ п/п	Показник	Смола			
		БДФО-1	БДФО-2	ББФС-1	ББФС-2
1	Зовнішній вигляд	Прозора світло-жовта в'язка рідина	Прозора світло-жовта в'язка рідина	Прозора світло-жовта в'язка рідина	Прозора світло-жовта в'язка рідина
2	Умовна в'язкість по віскозиметру ВЗ-246 з діаметром сопла 4 мм при (20 ± 2) °С, сек.	118	120	116	110
3	Густина, кг/л	0,99	0,99	0,97	0,98
4	Масова доля нелетких речовин, %	57	56	58	59
5	Час повного затвердіння покриття при температурі (20 ± 5) °С, годину	24-26	24-26	24-26	24-26
6	Твердість плівки по маятниковому приладу М-3, на 7 добу ум. од.	0,53	0,55	0,55	0,56
7	Еластичність покриття при вигині, не більш, мм	5	6	4	4
8	Адгезія до чорного металу, бали	3	3	2	2
9	Міцність при прямому ударі, см	40	40	50	50
10	Блиск при 45°, ум.од.	62	62	65	64
12	Розчинність	У спиртах, ароматичних вуглеводнях (толуолі, ксилолі)	У спиртах, ароматичних вуглеводнях (толуолі, ксилолі)	У спиртах, ароматичних вуглеводнях (толуолі, ксилолі)	У спиртах, ароматичних вуглеводнях (толуолі, ксилолі)

З представлених даних в таблиці 1 видно, що фізико-механічні показники отриманих смол не значно відрізняються, окрім показників еластичності покриття та міцності при ударі. Це вказує на те, що покриття БДФО-1, БДФО-2 є більш крихкими, ніж покриття на основі ББФС-1, ББФС-2.

З метою встановлення стійкості до термоокиснювальної деструкції синтезованих смол було проведено термогравіметричний аналіз, результати якого зображено на рисунку 4.

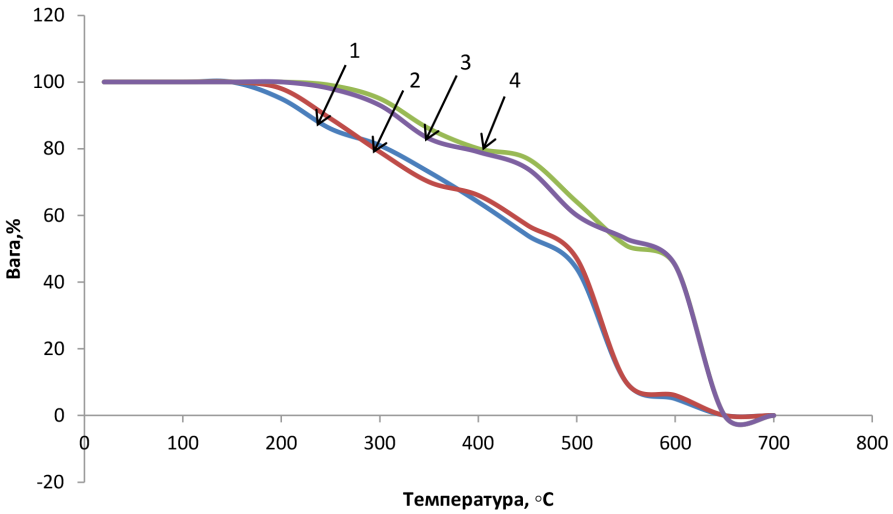


Рис. 4. Залежність зміни ваги при зміні температури від 25 °С до 700 °С: 1 – БДФО-1; 2 – БДФО-2; 3 – ББФС-1; 4 – ББФС-2

Аналізуючи отримані результати видно, що втрата маси покриттів на основі ББФС-1 та ББФС-2 починається при температурі 250–260 °С, в той час як для БДФО-1 та БДФО-2 при 175 °С. Виходячи із отриманих показників при температурі 600 °С втрата маси ББФС-1 та ББФС-2 становить трохи 45 %, в той час, як БДФО-1 та БДФО-2 розкладається практично повністю 5–6 %.

Розглядаючи в якості параметра термостійкості ступінь перетворення покриття при температурі 20–300 °С, то покриття (згідно нумерації наведеній в таблиці 1) за термостійкістю можна розташувати в наступний ряд:

$$№\ 4 = №\ 3 \geq №\ 2 \geq №\ 1$$

З представленого ряду видно що, найбільш термостійкими є ББФС-1 та ББФС-2. Ці результати доводять, що додавання бору підвищує термічну стабільність покриттів на основі дифенілолпропанформальдегідних смол. Це

також підтверджується даними літератури, відповідно до яких збільшення термічна стабільність смол буде збільшуватись зі збільшенням вмісту бору [4].

Висновки

В результаті проведеної роботи синтезовано борвмісні дифенілолпропанформальдегідні смоли та отримано покриття на їх основі. Встановлено, що покриття на основі борвмісних бутанолізованих дифенілолпропанформальдегідних олігомерів, модифікованих жирами рослинного походження мають кращі показники еластичності та міцності при ударі, а також вищу термічну стабільність, ніж подібні сполуки без бору. Так, початкова температура деградації покриттів підвищується на 75 °С.

Список використаної літератури

1. Kawamoto A. M., Pardini L. C., Diniz M. F., Lourenço V. L. Synthesis of a boron modified phenolic resin. *J. Aerosp. Technol. Manag*. № 2. 2010. P. 169–182.

2. Kulesh E. A., Piliptsou D. G., Rogachev A. V., Hong J. X., Fedosenko N. N., Kolesnyk V. Boron-carbon coatings: structure, morphology and mechanical properties. *Journal of Engineering Sciences*. 2020. V. 7(2). P. 1–9.

3. Zhang, L.; Zhang, X.; Wang, R.; Zhang, Y.; Wu, J.; Zhou, Z.; Yin, P. Research Progress in Boron-Modified Phenolic Resin and Its Composites. *Polymers*. 2023. V. 15. P. 3543–3555.

4. Jungang Gao, Weihong Wu, Xing Lic. Synthesis and Thermal Properties of a Boron-Containing Bisphenol-S Formaldehyde Resin. *Advanced Materials Research*. 2011. V. 239–242. P. 2905–2908.

5. Суворова Ю. О., Черваков О. В., Андріянова М. В., Бортницкий В. І., Комлякова О. М. Плівкоутворення бутанолізованих дифенілолпропан-формальдегідних олігомерів, модифікованих жирами рослинного та тваринного походження. *Питання хімії та хімічної технології*. 2016. V. 4. P. 67–72.

References

1. Kawamoto A. M., Pardini L. C., Diniz M. F., Lourenço V. L. (2010) Synthesis of a boron modified phenolic resin. *J. Aerosp.Technol. Manag*. № 2. P. 169–182.

2. Kulesh E. A., Piliptsou D. G., Rogachev A. V., Hong J. X., Fedosenko N. N., Kolesnyk V. (2020) Boron-carbon coatings: structure, morphology and mechanical properties. *Journal of Engineering Sciences*. V. 7(2). P. 1–9.

3. Zhang, L.; Zhang, X.; Wang, R.; Zhang, Y.; Wu, J.; Zhou, Z.; Yin, P. (2023) Research Progress in Boron-Modified Phenolic Resin and Its Composites. *Polymers*. V. 15. P. 3543–3555.

4. Jungang Gao, Weihong Wu, Xing Lic. (2011) Synthesis and Thermal Properties of a Boron-Containing Bisphenol-S Formaldehyde Resin. *Advanced Materials Research*. V. 239–242. P. 2905–2908.

5. Suvorova Y.A., Chervakov O. V., Andriianova M. V., Bortnitskiy D. I., Komlyakova O. N. (2016) Formation of films of butanolic dyphenyl propane formaldehyde oligomers modified by vegetable oils and animal fats. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. V. 4, p. 67–72.

УДК 678.7:615.07 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.2

В. І. БЕССАРАБОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-0637-1729

О. В. ІЩЕНКО
доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-9510-6005

О. О. ЧОРНИЙ
кандидат технічних наук,
старший інженер-технолог технологічної лабораторії ТЛЗ № 2
департаменту досліджень та розробки відділу технологічної розробки
Акціонерне товариство «Фармак»
ORCID: 0000-0002-6949-9247

В. Г. ХОМЕНКО
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0003-0013-8010

О. А. АНДРЕЄВА
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0001-8374-2306

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЕЛЕКТРОФОРМУВАННЯ ТА ВІДЦЕНТРОВОГО ФОРМУВАННЯ ВОЛОКОН ДЛЯ СТВОРЕННЯ ВИСОКОРОЗЧИННИХ ТВЕРДИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ІЗ ВМІСТОМ АКТИВНИХ ФАРМАЦЕВТИЧНИХ ІНГРЕДІЄНТІВ

У даній роботі наведено результати аналізу науково-літературних джерел щодо характеристики методів електроформування і відцентрового формування волокон та сучасних тенденцій їхнього використання для отримання високорозчинних твердих дисперсних систем (ТДС) з вмістом активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ).

Низька розчинність є однією з ключових проблем, що обмежують біодоступність значної кількості АФІ, тому розробка ефективних стратегій її покращення є актуальним напрямом сучасних хімко-фармацевтичних досліджень. Технологія утворення твердих дисперсних систем, в яких АФІ дисперговані в полімерній матриці, розглядаються як перспективний підхід до вирішення цієї проблеми. При цьому нині зростаючий дослідницький інтерес спостерігається до методів утворення твердих дисперсних систем у формі волокон. Встановлено, що технології електроформування та відцентрове формування волокон набувають широкої популярності в наукових колах та у промисловості.

Електроформування передбачає використання електростатичного поля для витягування полімерного розчину або розплаву у волокна субмікронного або нанометрового діаметру. Цей метод забезпечує можливість контролю морфологічних характеристик волокон, проте має певні обмеження, пов'язані з масштабуванням процесу та потребою у високих напругах. У процесі відцентрового формування волокон використовується відцентрова сила для генерації волокон з полімерних розчинів або розплавів із вмістом АФІ. Даний метод характеризується потенційними перевагами, такими як висока продуктивність, знижене енергоспоживання та можливість використання відносно простого обладнання. Згідно проведеного аналізу науково-літературних джерел, доведено, що нині обидва методи знаходять широке застосування у створенні ТДС у формі волокон з покращеною розчинністю АФІ різних фармакологічних груп. Вибір між електроформуванням та відцентровим формуванням

волокон залежить від конкретних вимог до морфології волокон ТДС, їхніх механічних властивостей, а також від масштабів виробництва та економічних міркувань.

Ключові слова: *тверді дисперсні системи, відцентрове формування волокон, електроформування, активний фармацевтичний інгредієнт, методи підвищення розчинності, полімери, полівінілпіролідон.*

V. I. BESSARABOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-0637-1729

O. V. ISHCHENKO
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-9510-6005

O. O. CHORNYI
Candidate of Engineering Sciences,
Senior Process Engineer of Technological Laboratory № 2
Department of Technological Development
R&D Department JSC Farmak
ORCID: 0000-0002-6949-9247

V. G. KHOMENKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Chemical Technologies and Resource Saving
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0003-0013-8010

O. A. ANDREYEVA
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0001-8374-2306

APPLICATION OF ELECTROSPINNING AND CENTRIFUGAL FIBRE FORMATION TECHNOLOGIES TO CREATE HIGHLY SOLUBLE SOLID DISPERSED SYSTEMS CONTAINING ACTIVE PHARMACEUTICAL INGREDIENTS

This paper presents the results of a comprehensive analysis of scientific and literary sources devoted to the characterisation of electrospinning and centrifugal fibre formation methods, as well as trends in their use for the production of highly soluble solid dispersed systems (SDSs) containing active pharmaceutical ingredients (APIs).

Low solubility is one of the key problems that limit the bioavailability of a significant number of APIs, so the development of effective strategies to improve it is an important area of modern chemical and pharmaceutical research. The technology of forming solid dispersed systems, in which APIs are dispersed in a polymer matrix, is considered a promising approach to solving this problem. Currently, there is a growing research interest in the methods of forming solid dispersed systems in the form of fibres. It has been established that the technologies of electrospinning and centrifugal fibre formation are gaining popularity in scientific circles and industry.

Electrospinning involves the use of an electrostatic field to draw a polymer solution or melt into sub-micron or nanometre diameter fibres. This method provides the ability to control the morphological characteristics of the fibres, but has certain limitations due to the scale of the process and the need for high voltages. The centrifugal fibre forming process uses centrifugal force to generate fibres from polymer solutions or melts containing APIs. This method is characterised by potential advantages such as high productivity, reduced energy consumption and the use of relatively simple equipment.

According to the analysis of scientific and literary sources, it has been proved that both methods are now widely used in the creation of fibrous SDS with improved solubility of APIs of various pharmacological groups. The choice between

electrospinning and centrifugal fibre formation depends on the specific requirements for the morphology of the SDS fibres, their mechanical properties, as well as on the production scale and economic considerations.

Key words: *solid dispersed systems, centrifugal fibre formation, electrospinning, active pharmaceutical ingredient, methods of increasing solubility, polymers, polyvinylpyrrolidone.*

Постановка проблеми

Відомо, що розчинність є одним із визначальних фізико-хімічних параметрів, що безпосередньо впливають на біодоступність речовин. У процесі розробки нових активних фармацевтичних інгредієнтів (АФІ) низька розчинність часто виступає лімітуючим фактором, який може значно знижувати їхню фармакологічну активність та терапевтичну ефективність. Згідно з науково-літературними даними, приблизно 70–90 % нових речовин, що перебувають на стадії розробки, а також близько 40 % АФІ у складі комерційно доступних лікарських засобів характеризуються низькою розчинністю [1, 2].

Відомо про низку фармацевтичних технологій, які нині успішно застосовуються для підвищення розчинності та подальшого покращення біодоступності значної кількості важкорозчинних активних фармацевтичних інгредієнтів, включаючи фізичні, хімічні методи та деякі технологічні прийоми [3, 4]. Серед них технологія твердих дисперсних систем (ТДС) вважається однією із найбільш цікавих та ефективних стратегій для покращення біодоступності важкорозчинних у воді АФІ. Тверді дисперсні системи являють собою композиційні матеріали (зазвичай двокомпонентні), у яких активний фармацевтичний інгредієнт молекулярно диспергований у полімерному носії. Найчастіше полімери, що використовуються для утворення ТДС, визначають кінцеві властивості композиції [3, 5]. Покращена розчинність АФІ у твердих дисперсних системах зумовлена оптимізацією фізико-хімічних властивостей: зменшення розміру частинок збільшує площу поверхні, висока пористість забезпечує доступність для розчинника, покращена змочуваність сприяє гідратації, а аморфний стан підвищує розчинність завдяки вищій вільній енергії [3–5].

Тверді дисперсні системи можуть бути виготовлені з використанням різних методів, включаючи плавлення, гарячу екструзію, методи на основі випаровування розчинника, такі як розпилювальне та сублімаційне сушіння, а також підходи без використання розчинників, зокрема подрібнення за допомогою кульового млина і повітряно-струменеве фрезерування [5]. У більшості досліджень, у яких повідомляється про використання технології твердих дисперсних систем для покращення розчинності важкорозчинних сполук застосовуються такі монолітні методи, як випаровування розчинника, екструзія гарячого розплаву та розпилювальне сушіння. Зазначені методи отримання твердих дисперсних систем демонструють значний потенціал щодо ефективності та масштабування для промислового виробництва. Це підтверджується прикладами комерційно доступних лікарських засобів на основі ТДС, отриманих цими методами, таких як Kaletra® (Abbott Laboratories), Zortress® (Novartis), Belsomra® (Merck), Epclusa® (Gilead Sciences), Symdeko® (Vertex) та інші [6]. Однак, незважаючи на потенційні переваги цих методів, у хіміко-фармацевтичній галузі все ще існує потреба в розробці нових інноваційних технологій отримання ТДС із покращеною біодоступністю АФІ.

Останнім часом у цьому контексті спостерігається підвищений інтерес до технологій виробництва ТДС у формі волокон. Вважається, що особлива пориста структура і високе співвідношення площі поверхні до об'єму волокон, а також регульовані характеристики змочуваності та еластичності, адаптовані властивості поверхні та межі розділу можуть бути ключовими перевагами для подолання проблем з розчинністю і біодоступністю багатьох АФІ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Згідно з аналізом останніх наукових досліджень і публікацій встановлено, що електроформування є одним відомих та найбільш часто використовуваних методів для виготовлення твердих дисперсних систем у вигляді волокон [7, 8]. За допомогою цього методу можна отримувати структуровані волокна з контрольованими властивостями пористості, морфології та розподілу активних фармацевтичних інгредієнтів у полімерній матриці. Полімерний розчин може бути водним, полімерним розплавом або емульсією, що, у свою чергу, призводить до утворення різних типів нано- або мікроволокон. Особливу увагу у дослідженнях приділяють оптимізації параметрів отримання ТДС методом електроформування, таких як напруга, швидкість подачі розчину, відстань до колектора та склад полімерного розчину, оскільки ці фактори визначають характеристики волокон, які напряму впливають на розчинність і біодоступність АФІ [7, 8].

Також разом із електроформуванням особливої актуальності в останні 10 років набула технологія утворення ТДС із використання методу відцентрового формування волокон, за допомогою якого можна виробляти волокна ТДС на високих швидкостях і з потенційно меншим споживанням енергії за рахунок використання простого обладнання [9, 10]. Особливістю даної технології є гнучкість, адже в її основі може бути як метод випаровування розчинника, так і процес плавлення речовин.

Отже, хоча електроформування і відцентрове формування є дещо різними методами, обидва мають значний потенціал для створення ТДС з покращеними характеристиками розчинності АФІ. Вибір між ними залежить від конкретних вимог до морфології волокон, механічних властивостей матеріалу, а також від обсягів виробництва,

що дозволяє здійснювати підбір методу для досягнення максимальних результатів в розробці ефективних високорозчинних ТДС із вмістом різних АФІ.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є комплексний аналіз та систематизація інформації сучасних науково-літературних джерел щодо характеристики методів електроформування і відцентрового формування волокон та тенденцій їхнього використання для отримання високорозчинних твердих дисперсних систем із вмістом активних фармацевтичних інгредієнтів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Електроформування є універсальною та надійною технологією, за допомогою якої можна виготовляти полімерні волокна або волокнисті ТДС в мікро- та нанометричному діапазоні з контрольованою морфологією поверхні [11]. Процес електроформування передбачає подачу розчину або розплаву полімеру, який може містити АФІ, через капіляр (наприклад, голку шприца) з заданою швидкістю подачі. До рідини прикладається електростатичне поле високої напруги, що індукує сили електростатичного відштовхування між однойменно зарядженими частинками в рідині та сили електростатичного притягання між зарядженою рідиною та заземленим колектором. Під впливом електростатичного поля високої напруги на поверхні рідини відбувається накопичення електричного заряду, що забезпечує утримання краплі на виході капіляра. При досягненні критичного значення напруги відбувається деформація меніска з подальшим утворенням конуса Тейлора. З вершини конуса Тейлора відбувається вивільнення струменя полімерного розчину, який зазнає витягування та зменшення діаметра в процесі руху до колектора. Розчинник, присутній у розчині, випаровується, що призводить до формування твердого волокнистого матеріалу зі струменя [11, 12].

У процесі утворення ТДС у формі волокон методом електроформування важливо, щоб АФІ і полімер добре розчинялися в обраному розчиннику та були сумісними один з одним. Правильний вибір розчинника часто впливає на морфологію кінцевих волокон та ступінь підвищення розчинності АФІ у складі ТДС. Часто використовуваними розчинниками у процесі електроформування є етанол, метанол, ацетон, диметилсульфоксид (ДМСО), дихлорметан, тетрагідрофуран та їхні суміші [13]. Більш значною мірою вивільнення АФІ з електросформованих волокон контролюється властивостями полімерного носія, тому вибір полімеру має важливе значення. Згідно аналізу науково-літературних джерел, у процесі електроформування ТДС широко використовуються такі фармацевтично прийнятні полімери, як полівінілпіролідон (ПВП), поліетиленгліколь (ПЕГ), полівініловий спирт (ПВС), а також природні полімери, зокрема крохмаль, хітозан і альгінат натрію [13, 14]. Також, відомо про застосування біорозкладних синтетичних полімерних носіїв, таких як полі(ε-капролактон) (PCL), полілактид-ко-гліколід (PLGA) та полімолочна кислота (PLA) для формування волокон із вмістом активних фармацевтичних інгредієнтів різних фармакологічних груп [15]. Використання цих полімерів у процесі електроформування дозволяє отримувати волокна ТДС з оптимізованими властивостями не тільки для покращення біодоступності, але й для забезпечення контрольованого вивільнення активних фармацевтичних інгредієнтів протягом тривалого часу. Окрім полімерного носія є низка інших факторів, які значною мірою впливають на процес отримання ТДС методом електроформування.

Фактори, що впливають на процес отримання ТДС методом електроформування, загалом класифікуються як параметри процесу, розчину та середовища, як узагальнено в таблиці 1.

Згідно з науковими даними, метод електроформування демонструє високу ефективність у створенні волокнистих твердих дисперсних систем, які мають потенціал для значного підвищення біодоступності активних фармацевтичних інгредієнтів. Зокрема, у літературних джерелах повідомляється, що за допомогою електроформування були успішно розроблені тверді дисперсні системи ірбесартану на основі ПВП К-90. Усі отримані ТДС характеризувалися кращими показниками розчинення, з оптимальним співвідношенням АФІ/полімер 3:7. У дослідженнях кінетики розчинення *in vitro* було встановлено, що близько 97 % АФІ вивільняється із сформованих волокон протягом 60 хвилин. Насичена розчинність композицій збільшилася до 245,32 ± 1,77 мкг/мл, що в шість разів перевищує розчинність ірбесартану за цих же умов (40,55 ± 1,01 мкг/мл). Це підтверджує успішне застосування електроформування для створення ТДС у формі волокон з покращеною біодоступністю ірбесартану [17].

Натомість інша дослідницька група довела, що із використанням методу електроформування можна отримувати стабільні ТДС із вмістом лопінавіру і ритонавіру. Застосування процесу електроформування призвело до повної аморфізації обох АФІ у складі ТДС у формі волокон, незалежно від вмісту АФІ та типу використовуваного полімеру: полівінілпіролідону К-30, кополівінілпіролідону/вінілацетату (Коллідон VA64) або поліметакрилату (Eudragit ® E100) [18].

Повідомляється також про тверду дисперсну систему спіронолактону, отриману методом електроформування, на основі прищепленого сополімера полівінілкапролактам-полівінілацетат-поліетиленгліколь, відомого під торговою назвою Soluplus®. Електросформовані надтонкі волокна ефективно збільшували розчинення АФІ у всіх досліджуваних буферних середовищах [19].

El-Newehy та його дослідницька група [20] підготували нановолокна твердих дисперсних систем, що містять полівініловий спирт, поліетиленоксид та метронідазол для контрольованого вивільнення активного

Таблиця 1

Основні фактори, що впливають на процес отримання ТДС методом електроформування [12, 16]

Параметр	Ефект
Параметри процесу	
Швидкість потоку	Підвищення швидкості потоку спричиняє збільшення діаметра волокон і, зрештою, призводить до утворення нестабільного конуса Тейлора.
Напруга	Зростання напруги сприяє зменшенню діаметра волокон, але надмірне підвищення може призвести до припинення їх утворення.
Колектор	Тип колектора визначає просторову структуру та конфігурацію розташування волокон.
Відстань голка-колектор	Збільшення відстані між голкою та колектором сприяє утворенню неоднорідних волокон із бісероподібною структурою, тоді як надмірне зменшення цієї дистанції може унеможливити формування волокон.
Параметри розчину	
В'язкість	Зі зростанням в'язкості формуються товстіші та однорідніші волокна, однак надто висока в'язкість може призвести до утворення кульок і засмічення сопла. При зниженій в'язкості утворюються тонші волокна, але надмірне зниження спричиняє електронапилення замість формування волокон.
Концентрація	Підвищення концентрації розчину сприяє утворенню волокон з більшим діаметром і меншою кількістю краплеподібних дефектів, однак надто висока концентрація може спричинити засмічення сопла. При надто низькій концентрації виникає розпилення замість формування волокон.
Параметри середовища	
Вологість	Рівень вологості впливає на швидкість випаровування розчинника: підвищена вологість може спричинити неповне висихання волокон.
Температура	Температура впливає на в'язкість розчину та швидкість випаровування розчинника: підвищення температури знижує в'язкість і сприяє більш інтенсивному випаровуванню розчинника.

фармацевтичного інгредієнта. Дослідження підтвердило, що з отриманих волокон вивільняється 84 % метронідазолу протягом 2 годин, а також було зафіксовано високу антимікробну активність волокнистих зразків ТДС щодо досліджуваних патогенів.

Група вчених з Китайського медичного університету Jinzhou у своїх роботах повідомила про утворення нановолокон з Ag-гесперидину [21]. В якості полімерних носіїв в електроформуванні використовували полівініловий спирт та альгінат натрію. Отримані нановолокна Ag-гесперидину демонстрували ефективні антибактеріальні властивості проти *S. aureus* і *E. coli* (ступінь інгібування > 90 %) і досягли високої здатності поглинання радикалів 1,1-дифеніл-1-пікрилгідразилу (ДФПГ) – 69 %. Експерименти з клітинами та дослідження загоєння ран на тваринах довели, що нановолокна Ag-гесперидину можуть прискорювати загоєння інфікованих ран. Імуногістохімічні дані також свідчать про те, що волокниста ТДС Ag-гесперидину прискорює загоєння ран [21].

Отже, уся наведена вище інформація підтверджує ефективність методу електроформування для створення волокнистих твердих дисперсних систем, що підвищують біодоступність активних фармацевтичних інгредієнтів. Однак, електроформування, хоча і здатне забезпечити виробництво високоякісних волокнистих структур ТДС, але цей метод має певною мірою обмежену продуктивність у промислових масштабах і вимагає використання високої напруги. Тому нині у якості багатообіцяючої альтернативи методу електроформування розглядається технологія відцентрового формування волокон. Дана технологія не є абсолютно новою для хімічної галузі, оскільки вона більше ніж півстоліття широко використовується у виробництві скляних волокон (також відомих як скловолокно) [22]. У 1990-х роках такі великі фірми, як BASF Aktiengesellschaft, Owens Corning Fiberglas і AkzoNobel NV, розпочали розробку полімерних волокон із застосуванням метода відцентрового формування [16, 22]. Після цього було опубліковано багато патентів, в яких обговорювалися обертові головки, здатні формувати волокна з полімерів у різних діапазонах розмірів. Крім того, технологічна корпорація FibeRio успішно комерціалізувала систему відцентрового формування волокон, призначену для великомасштабного виробництва полімерних волокон для хімічної галузі [23]. У 2008 році група дослідників [24] повідомила, що 5 % розчин поліметилметакрилату (ПММА) після вливання всередину головки, яка обертається зі швидкістю 3000 об/хв, під дією відцентрової сили перетворюється у нановолокна діаметром 25 нм за декілька секунд. Sarkar K. та його колеги в 2010 році [25] сконструювали кілька обертових головок, швидкість яких можна регулювати від 3000 до 5000 обертів на хвилину, що дозволяло виробляти полімерні волокна діаметром до 300 нм. Велика кількість дослідників повідомили про власні конструкції установок, у яких за допомогою відцентрової сили можна з широкого діапазону полімерних матеріалів генерувати волокна різної морфології та властивостей. У науково-літературних джерелах наявна інформація, яка підтверджує той факт, що в останні 20 років спостерігається експоненціальне збільшення кількості досліджень, спрямованих на використання методу відцентрового формування для виробництва полімерних волокон, які, у свою чергу, знаходять широке застосування у різних галузях [26].

Теоретична основа процесу відцентрового формування полягає в тому, що через високошвидкісне обертання головки з отворами (фільєри), в'язкий розчин або розплав, що міститься в ній, підлягає впливу відцентрової сили, яка, у свою чергу, витискає матеріал назовні. У процесі виходу із обертової головки розчинник (у разі

використання розчинів) випаровується, або розплав твердне, коли волокна рухаються у повітрі або в середовище коагуляції, що призводить до утворення твердих волокон. За допомогою даного методу можна отримувати волокна різного розміру із широкого діапазону матеріалів із полімерного розчину, або з полімерного розплаву з високою швидкістю та низькою вартістю завдяки простому обладнанню та відсутності потреби у використані високої напруги [27]. Однак вважається, що на відміну від полімерних розчинів, застосування у процесі відцентрового формування волокон саме розплавів матеріалів дозволяє уникнути проблем, пов'язаних з токсичністю розчинників і складнощами їх видалення.

При отриманні твердих дисперсних систем методом відцентрового формування волокон на структуру та морфологію кінцевого матеріалу також впливає ряд певних аспектів. По-перше, у даному процесі слід враховувати такі важливі параметри матеріалу, такі як температура плавлення АФІ та полімеру (для розплаву), в'язкість розчину та поверхневий натяг (для полімерних розчинів). По-друге, критично важливими є характеристики обладнання, зокрема, діаметр фільєри, швидкість обертання головки, температура процесу, відстань між колектором і обертовою головкою [28]. Параметри процесу відцентрового формування, які є критично важливими у процесі отримання ТДС у формі волокон, наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Основні фактори, що впливають на процес отримання ТДС методом відцентрового формування волокон [28, 29]

Параметри процесу	Відцентрова сила	Збільшення відцентрової сили призводить до розриву струменя волокна та утворення кульок	
	Швидкість обертання головки	Нижча кутова швидкість призводить до утворення вкраплень матеріалу у волокнах	
	Радіус отворів головки	Зменшення діаметра отвору призводить до зменшення діаметра волокна та більшої однорідності волокон	
	Відстань від головки до стінки колектора	Збільшення відстані призводить до розриву волокна. Зменшення відстані призводить до збільшення діаметра волокна	
	Температура в установці (для відцентрового формування з розплаву полімерів)	Підвищення температури викликає руйнування полімеру	
		Зниження температури призводить до збільшення діаметра волокна або повної відсутності струменя	
Характеристики використовуваних матеріалів	Для розчинів	В'язкість	Висока в'язкість призводить до відсутності утворення струменя волокон Занадто низька в'язкість призводить до утворення вкраплень у волокнах
		Концентрація розчину	Концентрація розчину повинна перевищувати критичне значення для досягнення подовження волокна
		Поверхневий натяг	Зменшення поверхневого натягу призводить до утворення волокон із вкрапленнями
	Для порошкоподібних матеріалів або їхніх розплавів	Температура плавлення	Занадто висока температура може призвести до деградації АФІ чи полімеру. Низька температура не дозволить матеріалу розплавитися належним чином, що призведе до нерівномірного розподілу та утворення дефектів у волокнах

Застосування методу відцентрового формування волокон як основи способу виробництва волокнистих твердих дисперсних систем з підвищеною біодоступністю АФІ було запропоновано не так давно і тому наразі у цій галузі він вважається інноваційним підходом.

З науково-літературних джерел відомо, що Mary L.A. та її колеги [30] розробили центрифуговані волокна із вмістом тетрацикліну на основі полімерів полівінілпіролідону та полікапролактону. Були виготовлені розчини полімерних носіїв та АФІ із використанням хлороформу як розчинника, і отримані розчини обережно вводили в обертову головку центрифуги за допомогою шприца при постійній швидкості 2000 об/хв. Дослідники встановили, що змінюючи концентрацію полімерних носіїв у волокнах можна регулювати вивільнення тетрацикліну. Виготовлені методом відцентрового формування волокон тверді дисперсії тетрацикліну продемонстрували ефективне пригнічення росту бактерій.

Eniko Bitay та її дослідницька група виготовили за допомогою відцентрового формування волокон тверді дисперсні системи лапатинібу [31], ацеклофенаку [32] та хлорзоксазону [33]. Усі тверді дисперсні систем із вмістом важкорозчинних АФІ було приготовано на основі полівінілпіролідону, який попередньо був спільно розчинений із заданими АФІ у етанолі. Результати цих досліджень підтвердили, що відцентрове формування волокон виявилося ефективним методом отримання ТДС із покращеною розчинністю усіх досліджуваних АФІ.

У роботі Li X. та його колег [34] повідомляється про отримання методом відцентрового формування волокна твердих дисперсних систем важкорозчинних у воді нестероїдних протизапальних АФІ ібупрофену та кетопрофену на основі полімерів крохмалю та поліетиленоксиду. Попередньо полімери та АФІ розчиняли у 2,0 % розчині

натрію гідроксиду і отриманий розчин вливали у установку для відцентрового формування, головка якої оберталася зі швидкістю 1500 об/хв. Отримані волокна обробляли розчином оцтової кислоти/глутарового альдегіду (1:1) протягом 12 годин при 40 °С з метою видалення залишків гідроксиду натрію у волокнах та покращення водостійкості. Дослідження кінетики *in vitro* показали, що понад 75 % АФІ можуть бути вивільнені з волокнистих структур без початкового розриву (>80 % протягом перших 2 годин). Волокна, із вмістом ібупрофену, продемонстрували тривалий період вивільнення АФІ (до 24 годин), тоді як кетопрофен вивільнявся із волокон більше ніж 48 годин.

Однак, варто зазначити, що в усіх наведених вище прикладах у методі відцентрового формування волокон ТДС використовуються у якості вихідних матеріалів є розчин АФІ та полімерного носія у органічному розчиннику. Залишковий вміст органічного розчинника та безпека процесу є основними вагомими обмежуючими факторами при реалізації цих рішень у промислових масштабах.

Одним із перших прикладів використання технології відцентрового формування волокон для виробництва твердих дисперсних систем без використання розчинників у процесі вважається виготовлення мікроволокнистих ТДС із вмістом оланзапіну та піроксикаму на основі сахарози за допомогою модифікованої машини для виробництва цукрової вати [35]. Розчинність обох активних фармацевтичних інгредієнтів у складі твердих дисперсних систем у формі волокон була набагато вищою у порівнянні з чистими сполуками та з фізичними сумішами із сахарозою. Пізніше ця дослідницька група розробила мікроволокна ТДС із вмістом ітраконазолу [36]. Отримані мікроволокна витримували в умовах високої відносної вологості (25 °С/75 % вологості) протягом 30 днів, щоб навмисно викликати рекристалізацію сахарози та розпад волокнистої структури на порошкоподібні частинки, які потім успішно були перероблені у таблетки за допомогою сухого змішування та прямого пресування. У цій роботі було показано, що підхід отримання таблеток із перекристалізованих мікроволокон ТДС ітраконазолу, які отримані відцентровим формування, є життєздатним методом для створення пероральних твердих лікарських засобів із покращеними характеристиками біодоступності АФІ ІІ класу за біофармацевтичною системою класифікації.

Натомість дослідники на чолі з S. Nasir [37] повідомили про виготовлення ТДС окскарбазепіну у формі волокон на основі різних комбінацій сахарози та полівінілпіролідону К-30. Найкращі результати були отриманні при застосування суміші АФІ сахарози та полімеру у відсотковому співвідношенні 20:60:20 відповідно. Розчинення *in vitro* окскарбазепіну із волокон становило >90 % протягом двох хвилин, що приблизно в 5 разів швидше, ніж чистого АФІ.

Процес відцентрового формування волокон виявився також ефективним способом для швидкого виробництва твердих дисперсних систем ібупрофену [38]. Середній час розчинення цього активного фармацевтичного інгредієнта в полімерних волокнах зменшився в 7 разів. Мікроволокна з ібупрофеном також показали вищу фармакологічну ефективність у зменшенні запальної реакції порівняно з чистим АФІ, що було підтверджено дослідженнями *in vivo* на кроликах.

Натомість група українських науковців вперше розробила технології отримання полімерних композиційних матеріалів у вигляді твердих дисперсних систем флавоноїда гесперидину [39] та протизапального АФІ німесуліду [1] на основі метода відцентрового формування волокон, що суттєво підвищило розчинність обох сполук у водних розчинах. Було доведено ефективність відцентрового формування волокон як екологічно чистої та економічно ефективної технології для виробництва ТДС німесуліду, яка покращує розчинність АФІ у воді у 3–6 раза, дотримуючись при цьому принципів сталого фармацевтичного виробництва [1]. Натомість для цей метод виявився ще більш ефективним у випадку отримання ТДС гесперидину, адже розчинність біофлавоноїда у складі відцентрово сформованих ТДС є вищою у 150–170 разів порівняно з розчинністю гесперидину як індивідуальної речовини. У цих роботах також вперше повідомляється про використання манітолу як допоміжної речовини для формування волокон ТДС з АФІ та полімером ПВП в установці для отримання цукрової вати [1, 39].

Згідно вище наведеного аналізу науково-літературних джерел можна зробити висновок, що технологія відцентрового формування волокон є новим ефективним підходом для формування твердих дисперсних систем у формі волокон із підвищеною біодоступністю активних фармацевтичних інгредієнтів та має значний потенціал до подальших наукових розвідок.

Висновки

Здійснено комплексний аналіз науково-літературних джерел щодо використання технологій електроформування та відцентрового формування волокон для розробки твердих дисперсних систем з покращеною розчинністю важкорозчинних АФІ. Встановлено, що обидва методи мають значний потенціал у створенні високорозчинних ТДС на основі широкого спектру полімерних носіїв, що є ключовими для підвищення біодоступності активних фармацевтичних інгредієнтів різних фармакологічних груп.

Встановлено, що електроформування забезпечує високий ступінь контролю над морфологією волокон, що дозволяє досягти високої стабільності твердих дисперсних систем. Однак, обмеження у масштабуванні та потреба у високій напрузі можуть бути перешкодами для промислового застосування. З іншого боку, відцентрове формування волокон є більш продуктивним та енергоефективним, що робить його привабливим для великомасштабного виробництва високорозчинних форм АФІ на хіміко-фармацевтичних підприємствах. Вибір методу отримання ТДС у формі волокон залежить від специфічних вимог до кінцевого продукту та обсягів виробництва. При цьому

як електроформування, так і відцентрове формування волокон мають значний науковий та практичний потенціал для подальших досліджень, спрямованих на розробку ТДС у формі волокон для покращення розчинності багатьох інших активних фармацевтичних інгредієнтів.

Список використаної літератури

1. Bessarabov V., Kostiuk V., Lyzhniuk V., Lisovyi V., Smishko R., Kuzmina G., Gureyeva S., Goy A. "Green" technology of centrifugal fiber formation of solid dispersed systems of nimesulide: Evaluation of solubility increases and physicochemical characteristics. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2025. Vol. 43. 101913. https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.101913

2. Zhang X., Xing H., Zhao Y., Ma Z. Pharmaceutical Dispersion Techniques for Dissolution and Bioavailability Enhancement of Poorly Water-Soluble Drugs. *Pharmaceutics*. 2018. Vol. 10, № 3. 74. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10030074

3. Patel K., Shah S., Patel J. Solid dispersion technology as a formulation strategy for the fabrication of modified release dosage forms: A comprehensive review. *Daru : journal of Faculty of Pharmacy, Tehran University of Medical Sciences*. 2022. Vol. 30, № 1. P. 165-189. https://doi.org/10.1007/s40199-022-00440-0

4. Kumari L., Choudhari Y., Patel P., Gupta G. D., Singh D., Rosenholm J. M., Bansal K. K., Kurmi B. D. Advancement in Solubilization Approaches: A Step towards Bioavailability Enhancement of Poorly Soluble Drugs. *Life (Basel, Switzerland)*. 2023. Vol. 13, № 5. 1099. https://doi.org/10.3390/life13051099

5. Лісовий В. М., Лижнюк В. В., Костюк В. Г., Пащенко І. О., Смішко Р. О., Гой А. М., Повшедна І. О., Іщенко О. В., Яременко В. В., Бессарабов В. І. Технології отримання високорозчинних полімерних композиційних матеріалів з активними фармацевтичними інгредієнтами. *Технології та інжиніринг*. 2023. Vol. 3, № 14. P. 26–35. https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.3

6. Zhang J., Guo M., Luo M., Cai T. Advances in the development of amorphous solid dispersions: The role of polymeric carriers. *Asian journal of pharmaceutical sciences*. 2023. Vol. 18, № 4. 100834. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2023.100834

7. Zare M., Dziemidowicz K., Williams G. R., Ramakrishna S. Encapsulation of Pharmaceutical and Nutraceutical Active Ingredients Using Electrospinning Processes. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*. 2021. Vol. 11, № 8. 1968. https://doi.org/10.3390/nano11081968

8. Yu D. G., Li J. J., Williams G. R., Zhao M. Electrospun amorphous solid dispersions of poorly water-soluble drugs: A review. *Journal of controlled release : official journal of the Controlled Release Society*. 2018. № 292. P. 91–110. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.08.016

9. Duan X., Chen H.-l., Guo C. Polymeric Nanofibers for Drug Delivery Applications: A Recent Review. *J. Mater Sci: Mater Med.* 2022. № 33. 78 https://doi.org/10.1007/s10856-022-06700-4

10. Marjuban S. M. H., Rahman M., Duza S. S., Ahmed M. B., Patel D. K., Rahman M. S., Lozano K. Recent Advances in Centrifugal Spinning and Their Applications in Tissue Engineering. *Polymers*. 2023. Vol. 15, № 5. 1253. https://doi.org/10.3390/polym15051253

11. Ahmadi Bonakdar M., Rodrigue D. Electrospinning: Processes, Structures, and Materials. *Macromol*. 2024. Vol. 4, № 1. P. 58–103. https://doi.org/10.3390/macromol4010004

12. Kausar A., Ahmad I. Electrospinning Processing of Polymer/Nanocarbon Nanocomposite Nanofibers–Design, Features, and Technical Compliances. *Journal of Composites Science*. 2023. Vol. 7, № 7. 290. https://doi.org/10.3390/jcs7070290

13. Haider A., Haider S., Kang I. K. A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry*. 2018. Vol. 11, № 8. P. 1165–1188. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015

14. Ishchenko O., Plavan V., Valeika V., Koliada M., Liashok I., Budash Y., Bessarabov V. Modified Starch in Composition with Polyvinyl Alcohol as a Basis for Development of the Polymeric Materials for Pharmaceutical Use. *Starch-Stärke*, 2022. Vol. 74 № 9–10. 2200062. https://doi.org/10.1002/star.202200062

15. Kai D., Liow S. S., Loh X. J. Biodegradable polymers for electrospinning: towards biomedical applications. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications*. 2014. № 45. P. 659–670. https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.04.051

16. Farhaj S., Conway B. R., Ghori M. U. Nanofibres in Drug Delivery Applications. *Fibers*. 2023. Vol. 11, № 2. 21. https://doi.org/10.3390/fib11020021

17. Adeli E. Irbesartan-loaded electrospun nanofibers-based PVP K90 for the drug dissolution improvement: Fabrication, in vitro performance assessment, and in vivo evaluation. *Journal of Applied Polymer Science*. 2015. Vol. 132, № 27. https://doi.org/10.1002/app.42212

18. Łyszczarz E., Sosna O., Srebro J., Rezka A., Majda D., Mendyk A. Electrospun Amorphous Solid Dispersions with Lopinavir and Ritonavir for Improved Solubility and Dissolution Rate. *Nanomaterials*. 2024. Vol. 14, № 19. 1569. https://doi.org/10.3390/nano14191569

19. Nagy Z. K., Balogh A., Vajna B., Farkas A., Patyi G., Kramarics A., Marosi G. Comparison of electrospun and extruded Soluplus®-based solid dosage forms of improved dissolution. *Journal of pharmaceutical sciences*. 2012. Vol. 101, № 1. P. 322–332. https://doi.org/10.1002/jps.22731

20. El-Newehy M. H., Al-Deyab S. S., Kenawy E.-R., Abdel-Megeed A. Fabrication of electrospun antimicrobial nanofibers containing metronidazole using nanospider technology. *Fibers and Polymers*. 2012. Vol. 13, № 6. P. 709–717. https://doi.org/10.1007/s12221-012-0709-4

21. Ren X., Hu Y., Chang L., Xu S., Mei, X., Chen Z. Electrospinning of antibacterial and anti-inflammatory Ag@ hesperidin core-shell nanoparticles into nanofibers used for promoting infected wound healing. *Regenerative biomaterials*. 2022. № 9. rbac012. https://doi.org/10.1093/rb/rbac012

22. Kase S., Matsuo T. Studies on melt spinning. I. Fundamental equations on the dynamics of melt spinning. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers*. 1965. Vol. 3, № 7. P. 2541–2554. https://doi.org/10.1002/pol.1965.100030712

23. Voelker H., Zettler H. D., Fath W., Berbner H. Production of fibers by centrifugal spinning : Patent No. US 5494616A United States. Application US08/239,311; Application 06.05.1994; Publication 27.02.1996.

24. Weitz R. T., Harnau L., Rauschenbach S., Burghard M., Kern K. Polymer nanofibers via nozzle-free centrifugal spinning. *Nano letters*. 2008. Vol. 8, № 4. P. 1187–1191. https://doi.org/10.1021/nl080124q

25. Sarkar K., Gomez C., Zambrano S., Ramirez M., De Hoyos E., Vasquez H., Lozano K. Electrospinning to forcespinning™. *Materials today*. 2010. Vol. 13, № 11. P. 12–14. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70199-1

26. Brako F., Nkwo M. Leveraging artificial intelligence for better translation of fibre-based pharmaceutical systems into real-world benefits. *Pharmaceutical Development and Technology*. 2024. Vol. 29, № 8. P. 793–804. https://doi.org/10.1080/10837450.2024.2395422

27. Rogalski J. J., Bastiaansen C. W. M., Peijs T. Rotary jet spinning review – a potential high yield future for polymer nanofibers. *Nanocomposites*. 2017. Vol. 3, № 4. P. 97–121. https://doi.org/10.1080/20550324.2017.1393919

28. Guo Q., Ye P., Zhang Z., Xu Q. Optimization Mechanism of Nozzle Parameters and Characterization of Nanofibers in Centrifugal Spinning. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*. 2023. Vol. 13, № 23. 3057. https://doi.org/10.3390/nano13233057

29. Stojanovska E., Canbay E., Pampal E. S., Calisir M. D., Agma O., Polat Y., Simsek R., Gundogdu N. A. S., Akgul Y., Kilic A. A review on non-electro nanofibre spinning techniques. *RSC advances*. 2016. Vol. 6 № 87. P. 83783–83801. https://doi.org/10.1039/C6RA16986D

30. Mary L. A., Senthilram T., Suganya S., Nagarajan L., Venugopal J., Ramakrishna S., Giri Dev V. R. Centrifugal spun ultrafine fibrous web as a potential drug delivery vehicle. *Express Polym. Lett*. 2013. Vol. 7, № 3. P. 238–248. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2013.22

31. Bitay E., Gergely A. L., Kántor J., Szabó Z. I. Evaluation of Lapatinib-Loaded Microfibers Prepared by Centrifugal Spinning. *Polymers*. 2022. Vol. 14, № 24. 5557. https://doi.org/10.3390/polym14245557

32. Bitay E., Gergely A. L., Szabó Z. I. Optimization and Production of Aceclofenac-Loaded Microfiber Solid Dispersion by Centrifugal Spinning. *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15, № 9. 2256. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15092256

33. Bitay E., Gergely A. L., Szabó Z. I. One-Step Preparation of Fiber-Based Chlorzoxazone Solid Dispersion by Centrifugal Spinning. *Polymers*. 2023. Vol. 16, № 1. 123. https://doi.org/10.3390/polym16010123

34. Li X., Lu Y., Hou T., Zhou J., Yang B. Centrifugally spun ultrafine starch/PEO fibres as release formulation for poorly water-soluble drugs. *Micro & Nano Letters*. 2018. Vol. 13, № 12. P. 1688-1692. https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5267

35. Marano S., Barker S. A., Raimi-Abraham B. T., Missaghi S., Rajabi-Siahboomi A., Craig D. Q. M. Development of micro-fibrous solid dispersions of poorly water-soluble drugs in sucrose using temperature-controlled centrifugal spinning. *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics : official journal of Arbeitsgemeinschaft fur Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V.* 2016. № 103. P. 84–94. https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.03.021

36. Marano S., Ghimire M., Missaghi S., Rajabi-Siahboomi A., Craig D. Q. M., Barker S. A. Development of Robust Tablet Formulations with Enhanced Drug Dissolution Profiles from Centrifugally-Spun Micro-Fibrous Solid Dispersions of Itraconazole, a BCS Class II Drug. *Pharmaceutics*. 2023. Vol. 15, № 3. 802. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030802

37. Nasir S., Hussain A., Abbas N., Bukhari N. I., Hussain F., Arshad M. S. Improved bioavailability of oxcarbazepine, a BCS class II drug by centrifugal melt spinning: In-vitro and in-vivo implications. *International journal of pharmaceutics*. 2021. № 604. 120775. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120775

38. Hussain A., Hussain F., Arshad M. S., Abbas N., Nasir S., Mudassir J., Mahmood F., Ali E. Ibuprofen-loaded centrifugally spun microfibers for quick relief of inflammation in rats. *Drug development and industrial pharmacy*. 2021. Vol. 47, № 11. P. 1786–1793. https://doi.org/10.1080/03639045.2022.2059500

39. Bessarabov V., Lisovyi V., Lyzhniuk V., Kostiuk V., Smishko R., Yaremenko V., Goy A., Derkach T., Kuzmina G., Gureyeva S. Development and characterisation of polymeric solid dispersed systems of hesperidin, obtained by centrifugal fibre formation. *Heliyon*. 2025. Vol. 11, № 4. e42702. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42702

References

1. Bessarabov, V., Kostiuk, V., Lyzhniuk, V., Lisovyi, V., Smishko, R., Kuzmina, G., Gureyeva, S., & Goy, A. (2025). "Green" technology of centrifugal fiber formation of solid dispersed systems of nimesulide: Evaluation of solubility increases and physicochemical characteristics. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *43*, 101913. https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.101913

2. Zhang, X., Xing, H., Zhao, Y., & Ma, Z. (2018). Pharmaceutical Dispersion Techniques for Dissolution and Bioavailability Enhancement of Poorly Water-Soluble Drugs. *Pharmaceutics*, *10*(3), 74. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics10030074

3. Patel, K., Shah, S., & Patel, J. (2022). Solid dispersion technology as a formulation strategy for the fabrication of modified release dosage forms: A comprehensive review. *Daru : journal of Faculty of Pharmacy, Tehran University of Medical Sciences*, 30(1), 165–189. https://doi.org/10.1007/s40199-022-00440-0

4. Kumari, L., Choudhari, Y., Patel, P., Gupta, G.D., Singh, D., Rosenholm, J.M., Bansal, K.K., & Kurmi, B.D. (2023). Advancement in Solubilization Approaches: A Step towards Bioavailability Enhancement of Poorly Soluble Drugs. *Life (Basel, Switzerland)*, *13*(5), 1099. https://doi.org/10.3390/life13051099

5. Lisovyi, V.M., Lyzhniuk, V.V., Kostiuk, V.G., Pashchenko, I.O., Smishko, R.O., Goy, A.M., Povshedna, I.O., Ishchenko, O.V., Yaremenko, V.V., Bessarabov, V.I. (2023). Tekhnolohii otrymannia vysokorozchynnykh polimernykh kompozytsiinykh materialiv z aktyvnymy farmatsevtychnymy inhrediientamy [Technologies for obtaining highly soluble polymeric composite materials with active pharmaceutical ingredients]. *Technologies and Engineering, 3*(14), 26–35. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.30857/2786-5371.2023.3.3

6. Zhang, J., Guo, M., Luo, M., & Cai, T. (2023). Advances in the development of amorphous solid dispersions: The role of polymeric carriers. *Asian journal of pharmaceutical sciences, 18*(4), 100834. https://doi.org/10.1016/j.ajps.2023.100834

7. Zare, M., Dziemidowicz, K., Williams, G.R., & Ramakrishna, S. (2021). Encapsulation of Pharmaceutical and Nutraceutical Active Ingredients Using Electrospinning Processes. *Nanomaterials (Basel, Switzerland), 11*(8), 1968. https://doi.org/10.3390/nano11081968

8. Yu, D.G., Li, J.J., Williams, G.R., & Zhao, M. (2018). Electrospun amorphous solid dispersions of poorly water-soluble drugs: A review. *Journal of controlled release : official journal of the Controlled Release Society, 292*, 91–110. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2018.08.016

9. Duan, X., Chen, H.-l,. & Guo, C. (2022). Polymeric Nanofibers for Drug Delivery Applications: A Recent Review. *J. Mater Sci: Mater Med, 33,* 78. https://doi.org/10.1007/s10856-022-06700-4

10. Marjuban, S.M.H., Rahman, M., Duza, S.S., Ahmed, M.B., Patel, D.K., Rahman, M.S., & Lozano, K. (2023). Recent Advances in Centrifugal Spinning and Their Applications in Tissue Engineering. *Polymers, 15*(5), 1253. https://doi.org/10.3390/polym15051253

11. Ahmadi Bonakdar, M., & Rodrigue, D. (2024). Electrospinning: Processes, Structures, and Materials. *Macromol, 4*(1), 58-103. https://doi.org/10.3390/macromol4010004

12. Kausar, A., & Ahmad, I. (2023). Electrospinning Processing of Polymer/Nanocarbon Nanocomposite Nanofibers – Design, Features, and Technical Compliances. *Journal of Composites Science, 7*(7), 290. https://doi.org/10.3390/jcs7070290

13. Haider, A., Haider, S., & Kang, I.K. (2018). A comprehensive review summarizing the effect of electrospinning parameters and potential applications of nanofibers in biomedical and biotechnology. *Arabian Journal of Chemistry, 11*(8), 1165–1188. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2015.11.015

14. Ishchenko, O., Plavan, V., Valeika, V., Koliada, M., Liashok, I., Budash, Y., & Bessarabov, V. (2022). Modified Starch in Composition with Polyvinyl Alcohol as a Basis for Development of the Polymeric Materials for Pharmaceutical Use. *Starch-Stärke, 74*(9–10), 2200062. https://doi.org/10.1002/star.202200062

15. Kai, D., Liow, S.S., & Loh, X.J. (2014). Biodegradable polymers for electrospinning: towards biomedical applications. *Materials science & engineering. C, Materials for biological applications, 45*, 659–670. https://doi.org/10.1016/j.msec.2014.04.051

16. Farhaj, S., Conway, B.R., & Ghori, M.U. (2023). Nanofibres in Drug Delivery Applications. *Fibers, 11*(2), 21. https://doi.org/10.3390/fib11020021

17. Adeli, E. (2015). Irbesartan-loaded electrospun nanofibers-based PVP K90 for the drug dissolution improvement: Fabrication, in vitro performance assessment, and in vivo evaluation. *Journal of Applied Polymer Science, 132*(27). https://doi.org/10.1002/app.42212

18. Łyszczarz, E., Sosna, O., Srebro, J., Rezka, A., Majda, D., & Mendyk, A. (2024). Electrospun Amorphous Solid Dispersions with Lopinavir and Ritonavir for Improved Solubility and Dissolution Rate. *Nanomaterials, 14*(19), 1569. https://doi.org/10.3390/nano14191569

19. Nagy, Z.K., Balogh, A., Vajna, B., Farkas, A., Patyi, G., Kramarics, A., & Marosi, G. (2012). Comparison of electrospun and extruded Soluplus®-based solid dosage forms of improved dissolution. *Journal of pharmaceutical sciences, 101*(1), 322–332. https://doi.org/10.1002/jps.22731

20. El-Newehy, M.H., Al-Deyab, S.S., Kenawy, E.-R., & Abdel-Megeed, A. (2012). Fabrication of electrospun antimicrobial nanofibers containing metronidazole using nanospider technology. *Fibers and Polymers, 13*(6), 709–717. https://doi.org/10.1007/s12221-012-0709-4

21. Ren, X., Hu, Y., Chang, L., Xu, S., Mei, X., & Chen, Z. (2022). Electrospinning of antibacterial and anti-inflammatory Ag@hesperidin core-shell nanoparticles into nanofibers used for promoting infected wound healing. *Regenerative biomaterials, 9*, rbac012. https://doi.org/10.1093/rb/rbac012

22. Kase, S., & Matsuo, T. (1965). Studies on melt spinning. I. Fundamental equations on the dynamics of melt spinning. *Journal of Polymer Science Part A: General Papers, 3*(7), 2541–2554. https://doi.org/10.1002/pol.1965.100030712

23. Voelker, H., Zettler, H.D., Fath, W., & Berbner, H. (1996). U.S. Patent No. 5,494,616. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office

24. Weitz, R.T., Harnau, L., Rauschenbach, S., Burghard, M., & Kern, K. (2008). Polymer nanofibers via nozzle-free centrifugal spinning. *Nano letters, 8*(4), 1187–1191. https://doi.org/10.1021/nl080124q

25. Sarkar, K., Gomez, C., Zambrano, S., Ramirez, M., De Hoyos, E., Vasquez, H., & Lozano, K. (2010). Electrospinning to forcespinning™. *Materials today, 13*(11), 12-14. https://doi.org/10.1016/S1369-7021(10)70199-1

26. Brako, F., & Nkwo, M. (2024). Leveraging artificial intelligence for better translation of fibre-based pharmaceutical systems into real-world benefits. *Pharmaceutical Development and Technology, 29*(8), 793–804. https://doi.org/10.1080/10837450.2024.2395422

27. Rogalski, J.J., Bastiaansen, C.W.M., & Peijs, T. (2017). Rotary jet spinning review – a potential high yield future for polymer nanofibers. *Nanocomposites, 3*(4), 97–121. https://doi.org/10.1080/20550324.2017.1393919

28. Guo, Q., Ye, P., Zhang, Z., & Xu, Q. (2023). Optimization Mechanism of Nozzle Parameters and Characterization of Nanofibers in Centrifugal Spinning. *Nanomaterials (Basel, Switzerland), 13*(23), 3057. https://doi.org/10.3390/nano13233057

29. Stojanovska E., Canbay E., Pampal E.S., Calisir M.D., Agma O., Polat Y., Simsek R., Gundogdu N.A.S., Akgul Y., Kilic A. (2016). A review on non-electro nanofibre spinning techniques. *RSC advances, 6*(87), 83783–83801, https://doi.org/10.1039/C6RA16986D

30. Mary, L.A., Senthilram, T., Suganya, S., Nagarajan, L., Venugopal, J., Ramakrishna, S., & Giri Dev, V.R. (2013). Centrifugal spun ultrafine fibrous web as a potential drug delivery vehicle. *Express Polym. Lett, 7*(3), 238–248. https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2013.22

31. Bitay, E., Gergely, A.L., Kántor, J., & Szabó, Z.I. (2022). Evaluation of Lapatinib-Loaded Microfibers Prepared by Centrifugal Spinning. *Polymers, 14*(24), 5557. https://doi.org/10.3390/polym14245557

32. Bitay, E., Gergely, A.L., & Szabó, Z.I. (2023). Optimization and Production of Aceclofenac-Loaded Microfiber Solid Dispersion by Centrifugal Spinning. *Pharmaceutics, 15*(9), 2256. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15092256

33. Bitay, E., Gergely, A.L., & Szabó, Z.I. (2023). One-Step Preparation of Fiber-Based Chlorzoxazone Solid Dispersion by Centrifugal Spinning. *Polymers, 16*(1), 123. https://doi.org/10.3390/polym16010123

34. Li, X., Lu, Y., Hou, T., Zhou, J., & Yang, B. (2018). Centrifugally spun ultrafine starch/PEO fibres as release formulation for poorly water-soluble drugs. *Micro & Nano Letters, 13*(12), 1688-1692. https://doi.org/10.1049/mnl.2018.5267

35. Marano, S., Barker, S.A., Raimi-Abraham, B.T., Missaghi, S., Rajabi-Siahboomi, A., & Craig, D.Q.M. (2016). Development of micro-fibrous solid dispersions of poorly water-soluble drugs in sucrose using temperature-controlled centrifugal spinning. *European journal of pharmaceutics and biopharmaceutics : official journal of Arbeitsgemeinschaft fur Pharmazeutische Verfahrenstechnik e.V, 103*, 84–94. https://doi.org/10.1016/j.ejpb.2016.03.021

36. Marano, S., Ghimire, M., Missaghi, S., Rajabi-Siahboomi, A., Craig, D.Q. M., & Barker, S.A. (2023). Development of Robust Tablet Formulations with Enhanced Drug Dissolution Profiles from Centrifugally-Spun Micro-Fibrous Solid Dispersions of Itraconazole, a BCS Class II Drug. *Pharmaceutics*, 15(3), 802. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics15030802

37. Nasir, S., Hussain, A., Abbas, N., Bukhari, N.I., Hussain, F., Arshad, M.S. (2021). Improved bioavailability of oxcarbazepine, a BCS class II drug by centrifugal melt spinning: In-vitro and in-vivo implications. *International journal of pharmaceutics, 604*, 120775. https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120775

38. Hussain, A., Hussain, F., Arshad, M.S., Abbas, N., Nasir, S., Mudassir, J., Mahmood, F., & Ali, E. (2021). Ibuprofen-loaded centrifugally spun microfibers for quick relief of inflammation in rats. *Drug development and industrial pharmacy, 47*(11), 1786–1793. https://doi.org/10.1080/03639045.2022.2059500

39. Bessarabov, V., Lisovyi, V., Lyzhniuk, V., Kostiuk, V., Smishko, R., Yaremenko, V., Goy, A., Derkach, T., Kuzmina, G., Gureyeva, S. (2025). Development and characterisation of polymeric solid dispersed systems of hesperidin, obtained by centrifugal fibre formation. *Heliyon, 11*(4), e42702. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e42702

УДК 629.08 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.3

В. М. БОЛДОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобілів та транспортної інфраструктури
Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»
ORCID: 0009-0008-5069-756X

ОЦІНКА ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МОТОРНОЇ ОЛИВИ ЗА ТЕРМООКИСЛЮВАЛЬНОЮ СТАБІЛЬНІСТЮ

У статті представлено результати дослідження термоокислювальної стабільності моторної оливи як одного з ключових показників їхньої експлуатаційної надійності та довговічності.

Розглянуто фізико-хімічні властивості моторних олив, що впливають на їх стійкість до процесів окиснення під впливом високих температур та механічного навантаження, які відбуваються під час роботи двигуна автомобіля.

Проаналізовані наслідки від процесу окиснення моторної оливи, що відбуваються під час роботи двигуна, а саме утворення різних кислот, лаків, шламів та інших небажаних продуктів, які негативно впливають на роботу двигуна.

Для визначення термоокислювальної стабільності моторних олив використовувався спеціалізований прилад, що моделює процеси окиснення в робочих зонах деталей під час експлуатації олив у двигунах автомобілів.

Для проведення дослідження була обрано синтетична моторна олива класу в'язкості SAE 5W40, марка ZIC SK X9. Дослідна марка моторної оливи використовувались в бензинових двигунах легкових автомобілів моделі Renault Logan. Для моторної оливи проводились дослідження та визначалися їх термоокислювальна стабільність. Під час експериментальних досліджень визначалися коефіцієнт термоокислювальної стабільності та коефіцієнт випаровуваності моторної оливи. На підставі отриманих результатів побудована графічна залежність зміни коефіцієнта термоокислювальної стабільності моторної оливи ZIC SK X9 від пробігу автомобіля.

Результати проведених експериментальних досліджень дозволяють встановити критерії вибору моторних олив для різних умов експлуатації легкових автомобілів, а також розробити рекомендації щодо підвищення їх термостабільності, покращення експлуатаційних властивостей та відповідно продовження терміну служби.

Отримані експериментальні дані мають практичну значущість для виробників мастильних матеріалів та споживачів, зацікавлених у підвищенні надійності роботи двигунів внутрішнього згоряння та зменшенні витрат мастильних матеріалів під час експлуатації автомобілів в різних умовах.

Ключові слова: *моторна олива, окиснення, стабільність, термоокислювальна стабільність, деталі двигуна внутрішнього згоряння, експлуатаційні властивості.*

V. M. BOLDOVSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Automobiles and Transport Infrastructure
National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute"
ORCID: 0009-0008-5069-756X

EVALUATION OF MOTOR OIL PERFORMANCE PROPERTIES BY THERMAL OXIDATION STABILITY

The article presents the results of a research on the thermal oxidation stability of motor oils as one of the key indicators of their operational reliability and durability.

The physical and chemical properties of motor oils that affect their resistance to oxidation processes under the influence of high temperatures and mechanical stress that occur during the operation of a car engine are considered.

The article analyzes the consequences of the engine oil oxidation process that occurs during engine operation, namely the formation of various acids, varnishes, sludges and other undesirable products that adversely affect engine performance.

To determine the thermal-oxidative stability of motor oils, a specialized device was used that simulates oxidation processes in the working areas of parts during the operation of oils in car engines.

For the research, a synthetic motor oil of viscosity class SAE 5W40, brand ZIC SK X9, was selected. The experimental brand of engine oil was used in gasoline engines of Renault Logan passenger cars. The engine oils were studied and their thermal oxidation stability was determined. During the experimental research, the coefficient of thermal oxidation stability and the coefficient of evaporation of engine oil were determined. Based on the results obtained, a graphical dependence of the change in the coefficient of thermal oxidation stability of ZIC SK X9 engine oil on the mileage of the car was constructed.

The results of the experimental studies make it possible to establish criteria for selecting engine oils for different operating conditions of passenger cars, as well as to develop recommendations for increasing their thermal stability, improving their performance properties and, accordingly, extending their service life.

The obtained experimental data are of practical importance for manufacturers of lubricants and consumers interested in improving the reliability of internal combustion engines and reducing the consumption of lubricants during the operation of cars in various conditions.

Key words: *engine oil, oxidation, stability, thermal oxidation stability, internal combustion engine parts, performance properties.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах інтенсивної експлуатації автомобілів значна увага приділяється якості та довговічності моторних олив. Однією з ключових характеристик, що впливає на експлуатаційні властивості олив, є їх стабільність до окиснення, яка визначає термін служби оливи, ефективність захисту деталей двигуна від зношування, а також рівень викидів шкідливих речовин.

Окиснення моторної оливи в процесі роботи двигуна є багатофакторним явищем, що залежить від температури, наявності кисню, каталізаторів окиснення (металевих домішок), а також хімічного складу оливи. Продукти окиснення спричиняють утворення кислот, лаків, смолистих відкладень, що знижують мастильні властивості, збільшують корозію деталей двигуна і погіршують його роботу.

В Україні зазвичай використовуються імпортні моторні оливи, які виготовляються, як в країнах Європейського союзу, так і в інших країнах.

У зв'язку з цим виникає наукова проблема в необхідності розробки ефективних методів експлуатаційної оцінки моторних олив за їх стабільністю до окиснення з урахуванням реальних умов експлуатації автомобілів. Важливим є розробка уніфікованого підходу до оцінки стабільності до окиснення для різних типів моторних олив, із синтетичними та напівсинтетичними основами, що мають комплексні пакети присадок, що враховує їхній склад, умови експлуатації та рівень навантажень.

Розв'язання цієї наукової проблеми вимагає великого об'єму досліджень, серед яких, розробка теоретичних моделей процесів окиснення моторних олив, проведення експериментальних досліджень для вивчення впливу температури, кисню, присадок і металевих домішок на швидкість окиснення, створення методик, які дозволяють прогнозувати термін служби оливи в реальних умовах експлуатації, вивчення впливу стабільності до окиснення на зменшення зносу деталей двигуна та поліпшення екологічних показників роботи двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ).

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Окислювальна стабільність моторних олив є ключовим показником їхньої експлуатаційної надійності та довговічності. Окиснення оливи під час роботи двигуна призводить до утворення кислот, лаків, шламів та інших небажаних продуктів, що можуть негативно впливати на роботу двигуна.

Дослідження, проведене в Національному університеті «Львівська політехніка», показало, що під час роботи мінеральної моторної оливи в бензиновому двигуні внутрішнього згоряння відбуваються значні зміни її вуглеводневого складу. Зокрема, накопичуються асфальто-смолисті речовини, а вміст парафіно-нафтенових вуглеводнів, які забезпечують змащувальні властивості, зменшується. Також виявлено утворення органічних сполук кислої природи (кислоти, альдегіди, кетони, спирти), що підвищує корозійну активність оливи щодо металевих деталей двигуна [1].

Для оцінки окислювальної стабільності моторних олив використовуються стандартизовані методи. Зокрема, ДСТУ ГОСТ 11063:2021 встановлює метод визначення стабільності за індукційним періодом утворення осаду, що дозволяє оцінити максимальний час окиснення, протягом якого масова частка осаду в окисненій оливі не перевищує 0,5 % [2]. Інший стандарт, ГОСТ 981-75, описує метод визначення стабільності проти окиснення для нафтових олив з присадками та без них, що характеризується кислотним числом, кількістю летких низькомолекулярних кислот та осаду, які утворюються при окисненні [3].

Дослідження, проведене в Національному авіаційному університеті, показало, що під час експлуатації автомобіля загальне лужне число моторної оливи знижується. Зокрема, для оливи Castrol Magnatec 5W-30 A3/B4 встановлено, що після пробігу 10000 км лужне число зменшується до критичного рівня, що свідчить про вичерпання мийно-диспергуючих присадок. Це підкреслює необхідність регулярної заміни оливи та додавання пакету присадок після очищення [4].

Під час експлуатації автомобіля відбуваються зміни хімічного складу і властивостей моторних олив. Стійкість олив проти окислювання є одним з найважливіших параметрів, що визначають поведінку оливи у вузлах тертя двигуна при експлуатації, лімітують термін його служби тощо. В процесі роботи в моторній оливі утворюються розчинні і нерозчинні з'єднання. В результаті окислювання моторної оливи утворюються лакові та вуглисті відкладення, низькотемпературні відкладення, органічні кислоти й інші продукти. Усе це погіршує якість олив, а також погіршується робота двигуна. Глибокі зміни якості олив викликають необхідність їх заміни згідно встановленою періодичністю.

Інтенсивність та швидкість окислювання моторної оливи залежить від її хімічного складу, умов експлуатації, технічного стану двигуна, якості палива, охолоджувальної рідини та інших факторів. В результаті правильного вибору оливи, своєчасного контролю за технічним станом системи змащення двигуна автомобіля збільшується термін служби оливи, скорочується витрата палива.

На окислюваність моторних олив впливають температура, поверхня контакту з повітрям (поверхня окислювання), каталітична дія деяких металів, присутність кисню повітря, води, старих продуктів окислювання. Однак основним фактором є температура. Під дією високих температур моторна олива піддається інтенсивному окислюванню, полімеризації, конденсації, розкладанню, коксуванню. Продукти окислення олив сприяють утворенню лака і нагару на деталях поршневої групи [5, 6].

Термоокислювальна стабільність характеризує властивість оливи під дією високої температури утворювати на поверхні деталей двигуна лакові відкладення. Термоокислювальна стабільність моторної оливи вимірюється часом (хвилини), на протязі якого дослідна олива при температурі +250 °С перетвориться в залишок, що складається з 50 % робочої фракції і 50 % лаку.

Окислювальна стабільність моторних олив є критично важливою для забезпечення надійної роботи двигунів автомобілів. Сучасні дослідження та стандарти надають методи оцінки та контролю цього показника, що дозволяє своєчасно виявляти та запобігати негативним наслідкам окиснення оливи під час експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Метою досліджень є визначення стану моторних олив для автомобілів за термоокислювальною стабільністю.

Для вирішення поставленої мети сформульовані наступні завдання:

Визначити закономірності зміни процесу окислення моторної оливи підчас експлуатації.

Встановити доцільність використання моторних олив на основі дослідження їх стану за термоокислювальною стабільністю.

Викладення основного матеріалу дослідження

Окислювальна стійкість моторних олив є ключовим фактором, що визначає їх антиокиснювальні властивості. Інтенсивне окиснення спостерігається на поверхнях деталей двигунів, нагрітих до високих температур (понад 90 °С).

Для оцінки термоокислювальної стабільності моторних олив було використано спеціальний прилад, який імітує процеси окиснення у робочих зонах деталей під час експлуатації олив у двигунах автомобілів.

Методика випробувань включала наступні етапи: у спеціальну камеру приладу заливали пробу моторної оливи об’ємом 250 мл, яку нагрівали до температури 180 °С. Під час нагрівання здійснювалося перемішування оливи мішалкою із швидкістю 330 об/хв. Цей режим було обрано експериментально з урахуванням вимоги уникнення турбулентного потоку, що забезпечує максимальну швидкість окиснення. Тривалість випробування становила 3 години.

Через кожну годину дослідження проби моторної оливи зважували для визначення маси випаровуваних компонентів, а також відбирали для фотометричного аналізу. Залишок оливи після кожного етапу продовжували досліджувати за раніше визначеними параметрами. Коефіцієнт випаровуваності характеризується як частка між відповідною масою після і-го окислення (г) та масою перед і-м окисленням (г).

Для проведення дослідження була обрано синтетична моторна олива класу в’язкості SAE 5W40, марка ZIC SK X9. Дослідна марка моторної оливи використовувались в бензинових двигунах легкових автомобілів моделі Renault Logan. Під час експлуатації автомобілів забір проб моторної оливи з системи змащення двигуна здійснювався в об’ємі 200 мл, через кожні 3 тис. км пробігу автомобіля. Для відібраних проб моторної оливи проводились дослідження та визначалися їх термоокислювальна стабільність.

Результати отриманих дослідних показників моторної оливи ZIC SK X9 наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження стану моторної оливи ZIC SK X9 за термоокиснюваною стабільністю

Інтервал між виконанням відбору проб моторної оливи, тис. км	Коефіцієнт термоокиснювальної стабільності	Коефіцієнт випаровуваності
0	0,462	0,029
3	0,616	0,057
6	0,820	0,114
9	0,963	0,143
12	0,988	0,157

На підставі отриманих результатів дослідження побудована графічна залежність зміни коефіцієнта термоокислювальної стабільності моторної оливи ZIC SK X9 від пробігу автомобіля (рис. 1).

Зміна термоокислювальної стійкості моторних олив відображає зміну їх відносної в’язкості, що враховує стан спрацювання комплексу присадок та додаткових елементів. Чим інтенсивніше відбувається спрацювання присадок і функціональних добавок, тим активніше формуються об’єми відпрацьованих частинок в оливі. Ефективність оливи та контроль цих включень залежать від її стійкості до впливу температурних факторів.

Процес окиснення моторної оливи призводить до змін її властивостей, зокрема випаровуваності та в’язкості. У таких умовах доцільно оцінювати працездатність моторної оливи за змінами коефіцієнта її термоокиснювальної стабільності.

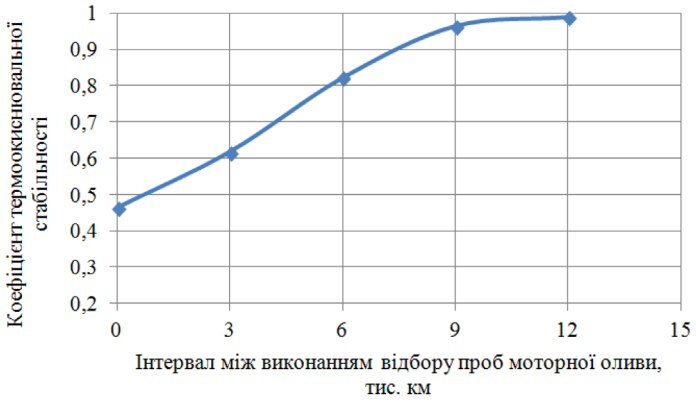


Рис. 1. Зміна коефіцієнта термоокислювальної стабільності моторної оливи ZIC SK X9 від пробігу автомобіля

Висновки

В результаті проведених експериментальних досліджень моторної оливи SAE 5W40, марка ZIC SK X9 на автомобілях Renault Logan виявлено, що вона відповідає високій якості та забезпечує збереження властивостей під час всього регламентованого періоду її використання.

Отримані результати зміни термоокислювальної стабільності моторної оливи дозволили оцінити її властивості за стабільністю до окиснення та підтвердили доцільність використання для автомобілів даного класу.

Список використаної літератури

1. Корчак Б. О., Гринишин О. Б., Червінський Т. І. Зміна складу та властивостей мінеральної моторної оливи після її експлуатації Національний університет «Львівська політехніка». Науковий вісник НЛТУ України. 2017. Том 27 № 6. С. 93–97.

2. ДСТУ 11063:2021 Оливи моторні з додатками. Метод визначення стабільності за індукційним періодом утворювання осаду. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96747.

3. ГОСТ 981-75 Оливи нафтові. Метод визначення стабільності проти окиснення. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=97236.

4. Єфименко В. В., Калмикова Н. Г., Єфіменко О. В. Оцінка якості моторних олив у процесі їх експлуатації // X Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ у нафтопереробній та нафтогазовій промисловості», 18–23 травня 2020, Львів, «Львівська політехніка», 2020. С. 71–74.

5. Бойченко С. Оливи. Моторні, турбінні, гідравлічні та трансмісійні: властивості та якість. Підручник / С. Бойченко, А. Пушак, П. Топільницький, Й. Любінін, К. Лейда. К. : «Центр учбової літератури», 2019. 323 с.

6. Чабанний В. Я. Паливо-мастильні матеріали, технічні рідини та системи їх забезпечення. / В. Я. Чабанний. Кіровоград : Центрально-Українське видавництво, 2008. 353 с.

References

1. Korchak B. O., Hrynyshyn O. B., Chervinskyi T. I. (2017) Zmina skladu ta vlastyvostei mineralnoi motornoi olyvy pislia yii ekspluatatsii [Changes in the composition and properties of mineral motor oil after its operation]. National University “Lviv Polytechnic”. Scientific Bulletin of Lviv Polytechnic National University, vol. 27, no. 6, pp. 93–97.

2. DSTU 11063:2021 Olyvy motorni z dodatkamy. Metod vyznachennia stabilnosti za induktsiinym periodom utvoriuvannia osadu [Motor oils with applications. Method for determining stability by induction period of sedimentation]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=96747.

3. HOST 981-75 Olyvy naftovi. Metod vyznachennia stabilnosti proty okysnennia [Petroleum oils. Method for determining stability against oxidation]. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=97236.

4. Yefymenko V. V., Kalmykova N. H., Yefimenko O. V. (2020) Otsinka yakosti motornykh olyv u protsesi yikh ekspluatatsii [Assessment of the quality of motor oils during their operation]. X International Scientific and Technical Conference “Progress in the Oil Refining and Oil and Gas Industry”, Lviv Polytechnic, May 18-23, pp. 71–74.

5. Boichenko S., Pushak A., Topilnytskyi P., Liubinin Y., Leida K. (2019) Olyvy. Motorni, turbinni, hidravlichni ta transmisiini: vlastyvosti ta yakist [Oils. Motor, turbine, hydraulic and transmission oils: properties and quality]. Kyiv : Center for Educational Literature. (in Ukrainian)

6. Chabannyi V. Ya. (2008) Palyvo-mastylni materialy, tekhnichni ridyny ta systemy yikh zabezpechennia [Fuel and lubricants, technical fluids and systems for their provision]. Kirovohrad: Central Ukrainian Publishing House. (in Ukrainian)

УДК 534.8:665.6 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.4

Р. О. БОНДАР
аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-9383-4130

І. А. ГРИШКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-5709-1359

УСТАНОВКА ДЛЯ КАВІТАЦІЙНОГО ГІДРУВАННЯ ВАЖКИХ НАФТОПРОДУКТІВ

У статті висвітлено етапи створення установки для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів на базі ультразвукового трубчастого кавітатора. Ця установка забезпечує ефективну переробку важких нафтопродуктів, включаючи мазути та парафінові фракції, отримуючи 100 % товарної продукції за декілька циклів, що дозволяє знизити енергетичні витрати та підвищити вихід світлих фракцій, таких як бензин і дизель. Особливістю технології є концентрація ультразвукової енергії в центральній частині циліндричної кавітаційної камери, яка сприяє розриву молекулярних зв'язків та ефективному розщепленню молекул вуглеводнів.

Запропоноване рішення дає змогу зменшити негативний вплив на довкілля та покращити економічні показники процесу переробки. Проведено аналіз недоліків існуючих методів, таких як каталітичне розщеплення, термохімічний метод і зневоднення із подальшим захороненням сухих залишків, що підкреслює переваги кавітаційного методу. Також створено систему фракційної перегонки рідини, яка дозволяє розділити компоненти нафтопродуктів (бензин, газ, дизель) в лабораторних умовах, забезпечуючи оперативне регулювання параметрів процесу.

Методика створення установки базується на технологіях з використанням ультразвукової енергії та кавітаційних процесах. Це забезпечує високу ефективність розщеплення вуглеводневих молекул навіть для важких нафтопродуктів. Описано принципи роботи ультразвукового крекінгу, наведено гідравлічні схеми та конструктивні особливості установки.

Застосування даної технології сприятиме вирішенню проблем обмежених ресурсів традиційної нафти та дозволяє оптимізувати процес переробки важких нафтопродуктів з екологічної та економічної точки зору. Особливу увагу приділено перспективам оптимізації процесу регулювання подачі водневого газу та часу дії ультразвукової кавітації, а також контролю тиску та температури з метою виходу якомога більшої кількості світлих фракції обробленого нафтопродукту.

Ключові слова: *переробка важких нафтопродуктів, кавітаційне гідрування, важкі нафтопродукти, ультразвуковий трубчастий кавітатор, розщеплення вуглеводнів, фракційна перегонка, переробка нафти, ультразвук, кавітація, переробка нафти.*

R. O. BONDAR
Postgraduate Student at the Department of Applied Hydroaeromechanics and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0008-9383-4130

I. A. HRYSHKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Hydroaeromechanics and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-5709-1359

QUIPMENT FOR CAVITATION HYDROGENATION OF HEAVY PETROLEUM PRODUCTS

The article highlights the stages of creating a setup for cavitation hydrogenation of heavy petroleum products based on an ultrasonic tubular cavitator. This setup ensures the efficient processing of heavy petroleum products, including fuel oils and paraffin fractions, achieving 100 % marketable products within several cycles. This allows for reduced

energy consumption and increased yields of light fractions, such as gasoline and diesel. A key feature of the technology is the concentration of ultrasonic energy in the central part of the cylindrical cavitation chamber, which promotes the breaking of molecular bonds and the effective cracking of hydrocarbon molecules.

The proposed solution reduces the environmental impact and improves the economic performance of the processing operation. An analysis of the shortcomings of existing methods, such as catalytic cracking, thermochemical methods, and dewatering with subsequent burial of dry residues, emphasizes the advantages of the cavitation method. A system for fractional distillation of liquids was also developed, enabling the separation of petroleum product components (gasoline, kerosene, diesel) under laboratory conditions, ensuring the ability to adjust process parameters in real-time.

The methodology for creating the setup is based on technologies utilizing ultrasonic energy and cavitation processes. This ensures high efficiency in the cracking of hydrocarbon molecules, even for heavy petroleum products. The principles of ultrasonic cracking are described, along with hydraulic schemes and design features of the setup.

The application of this technology will help address the challenges posed by limited traditional oil resources and allows for optimizing the processing of heavy petroleum products from both ecological and economic perspectives. Special attention is given to the prospects of process optimization through regulating the supply of hydrogen gas, the duration of ultrasonic cavitation exposure, and controlling pressure and temperature to maximize the yield of light fractions from the treated petroleum product.

Key words: *refining of heavy petroleum products, cavitation hydrogenation, heavy petroleum products, ultrasonic tubular cavitator, hydrocarbon splitting, fractional distillation, petroleum refining, ultrasonic, cavitation, petroleum refining.*

Постановка проблеми

Економічний розвиток та зростання населення за останні десятиліття спричинили підвищення попиту на викопне паливо. Як результат відбулось зменшення запасів так званої «традиційної» нафти, включно з легкою та середньою в'язкістю. Їх стає дедалі менше та є недостатніми для задоволення постійно зростаючих потреб у паливних та енергетичних ресурсах. Нетрадиційні запаси нафти, що включають надважку нафту, важку високов'язку нафту (ННО), горючі сланці, бітуми та нафтові піски, слугують альтернативою викопному паливу. Передбачають, що в майбутньому важкі та надважкі нафти стануть альтернативою звичайним нафтам, проте зважаючи на їх хімічний склад і фізико-хімічні властивості, необхідно вирішити ряд проблем, які пов'язані з їх видобутком, подальшим транспортуванням на заводи з нафтопереробки та подальші шляхи їх раціональної обробки [1, 2]. Важкою нафтою називають суміш рідких вуглеводнів, що характеризується щільністю 860–1000 кг/м^3 та має в'язкість 10–100 МПа·с. Поклади важкої нафти залягають на глибинах від 300 м до більш ніж 1500 м. Також їм притаманні високий вміст смолисто-асфальтенових речовин, ароматичних вуглеводнів та висока концентрація металів і сполук сірки [3, 4]. Дані показники спричиняють збільшення собівартості виробництва, а також збільшують складність та вартість транспортування сировини існуючими нафтопроводами та ускладнення переробки нафтопродуктів за класичними схемами [3, 4].

Кількість світових запасів важкої нафти (рис. 1) за оцінкою геологічної служби США складає 434 мільярди барелів. Найбільші ресурси важких високов'язких нафт знаходиться на території Північної та Південної Америки, а також на Близькому Сході [5, 6].

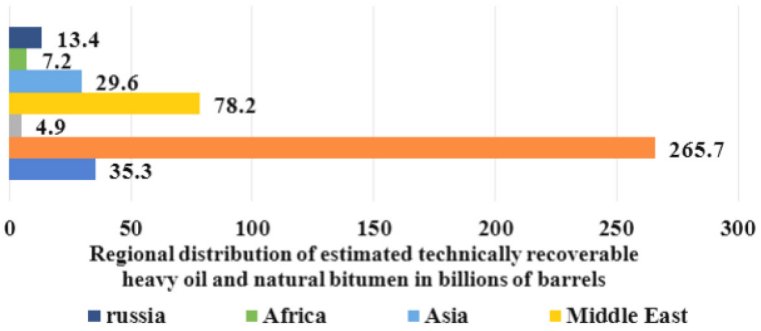


Рис. 1. Оцінка запасів важкої нафти у світі [5, 6]

Багато промислово розвинутих країн світу вважають важку нафту основною для розвитку нафтовидобутку в майбутньому. Так як в найближчі роки буде відбуватись видобування все більшої кількості важкої нафти, актуальності набуває і розвиток надійних технологій, що впливає на реологічні властивості сирої нафти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день існують методи переробки мазуту, що є одним з видів важких нафтопродуктів, зокрема каталітичне розщеплення, термохімічний метод, зневоднення з подальшим захороненням сухих залишків. Проте дані методи мають ряд недоліків [7].

Недоліки каталітичного розчеплення:

1. Високі витрати на обладнання [8].
2. Складність керування процесом. Дані методи потребує керування різними параметрами, такими як температура, тиск, склад та розмір каталізатора, що впливають на якість та кількість отриманого палива [8].
3. В процесі каталітичного розщеплення мазуту може виділятись велика кількість тепла, а також шкідливі речовини, які можуть створювати небезпеку для робочого персоналу і навколишнього середовища [8, 9].
4. Обмеженість використання. Каталітичне розщеплення мазуту застосовується виключно на важких мазутах, так як процес може бути неефективним для легких нафтопродуктів, що обмежує використання даного методу для отримання палива [8].

Недоліки термохімічного методу:

1. Для забезпечення високих тисків, температур та інших параметрів процесу термохімічної переробки мазуту необхідне значне споживання електроенергії [10].
2. Даний метод переробки мазуту має значний негативний вплив на довкілля через велику кількість викидів парникових газів [11].
3. Під час переробки мазуту виникає значна кількість відходів, що вимагає додаткових зусиль для їхньої обробки та утилізації [12].
4. Даний метод переробки мазуту може створювати небезпечні умови праці для співробітників, які працюють на заводах з переробки, у зв'язку з високими температурами та рядом інших факторів [12].

Недоліки зневоднення мазуту з подальшим захороненням сухих залишків:

1. Під час зневоднення досить часто виникають технічні проблеми, такі як засмічення обладнання чи проблеми з управлінням вологою та температурою [13].
2. Мазут, що містить велику кількість сірки, є небезпечним для довкілля та здоров'я людей. При зневодненні мазуту, зменшення вологості збільшує концентрацію сірки в мазуті, що може вплинути на довкілля, особливо при його захороненні [14].
3. При захороненні виникають певні ризики викиду забруднювальних речовин в атмосферу, що впливають на здоров'я людей та навколишнє середовище [15, 16].
4. Зневоднення мазуту є менш економічно ефективним порівняно з іншими методами переробки, особливо при високих витратах на енергію та обладнання [17].

Важливим загальним недоліком є відсутність переробки важких нафтопродуктів у 100 % товарну продукцію [18].

Формулювання мети дослідження

Метою є розробка установки, яка дозволяє отримувати високий відсоток світлих фракцій з важких нафтопродуктів, шляхом їх переробки методом кавітаційного гідрування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Також існує метод кавітаційного гідрування, який вирішує проблему переробки важких нафтопродуктів у 100 % товарну продукцію за декілька циклів. Одним з таких прикладів є установка для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук розроблена Войтовичем О. В. Установка для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук складається з корпусу, який виконаний з можливістю здійснення кавітаційного процесу у вуглеводневій сировині, акустичних ультразвукових випромінювачів у порожнині установки (реактора), вертикальної мішалки (ротаційного змішувача) з метою забезпечення гідродинаміки псевдозрідженого шару потоку в реакторі, пристрою для подачі вуглеводневої сировини у зону реакції, пристрою для відбору і виведення цільового продукту. Також до установки входять контейнер для каталізатора та каталізатор, що розміщений у контейнері в зоні кавітуючого потоку (у верхній частині реактора) у псевдозрідженому вихровому шарі каталізатора. Оснащена пристроями, що дозволяють реалізувати зміну швидкості обертання мішалки, пристроями з метою подачі водневмісних речовин і їх змішування з вуглеводневими сполуками. Сам корпус виконано у вигляді подовженого циліндра, який встановлений вертикально і забезпечений двома торцевими кришками, які забезпечують вакуумну щільність. У верхній торцевій кришці передбачені отвори для установки акустичних ультразвукових випромінювачів, а в нижній для встановлення пристроїв, що реалізують подачу водневмісних речовин, вуглеводневої сировини та їх змішування. Схема данох установки представлена на рисунку 2 [19].

Спираючись на актуальність теми та перспективи методу кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів, було прийняте рішення реалізувати дану технологію з використанням трубчастого кавітатора (рис. 3), який має більшу область обробки рідини та високу інтенсивність ультразвукових коливань [20], що є одним з основних факторів, який дозволяє здійснити розрив молекулярних зв'язків нафтопродуктів

Даний кавітатор дозволяє здійснити концентрацію ультразвукової енергії у центральній частині циліндричної камери, що наочно показано на рисунку 4. Також шляхом підвищення напруги збудження резонансних п'єзоелектричних приводів здійснюється підвищення інтенсивності коливань, відповідно кавітаційна область поступово розширюється. При подальшому збільшені амплітуди коливань відбувається розширення кавітаційної області до внутрішньої поверхні камери [20].

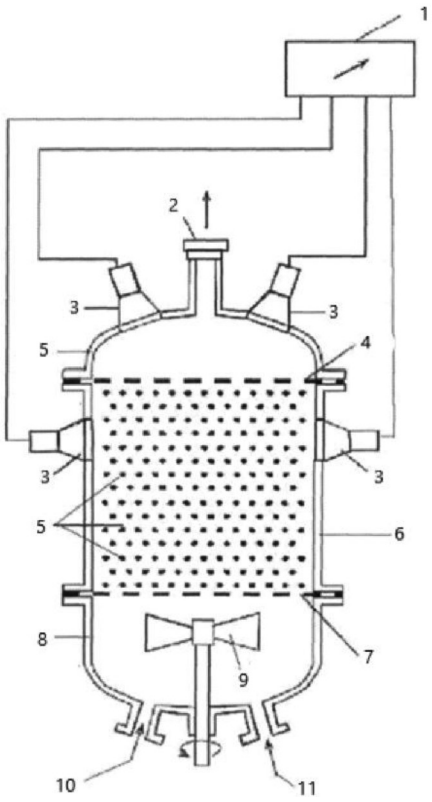
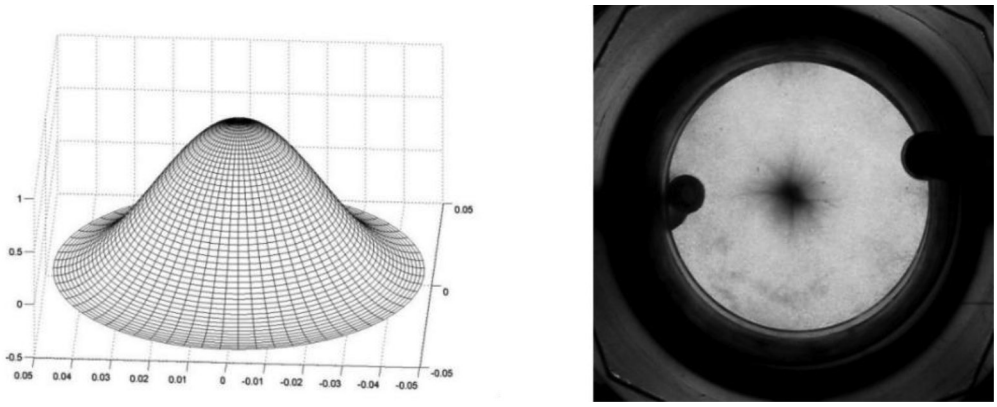


Рис. 2. Схема установки (1 – блок керування випромінювачем, 2 – вихідний отвір з реактора, 3 – ультразвукові випромінювачі, 4 – сітка фільтра верхнього, 5 – каталізатор, 6 – реактор, 7 – сітка фільтра нижнього, 8 – дно реактора, 9 – багатолопатевий ротаційний змішувач, 10 – вхід для вуглеводневої сировини, 11 – вхід для газової добавки) [19]



Рис. 3. Ультразвуковий трубчастий кавітатор [20]

Виходячи зі схеми установки розробленої Войтовичем О. В. та принципу роботи технології кавітаційного гідрування в розроблювальному нами стенді, окрім трубчастого ультразвукового кавітатора, необхідно передбачити трубопровід для подачі водневого газу через регулятор витрати (РВ) та місця для подачі оброблюваного нафтопродукту через горловину (Г) та кран (КР1) до кавітаційної камери (К) та зливу рідини після обробки через кран (КР2) [19]. Також слід зазначити, що під час впливу ультразвукової кавітації на оброблювальну рідину збільшується її температура. В процесі обробки нафтопродуктів при температурі вище 90 °С починається процес газифікації, тобто можуть виділятися розчинені гази, такі як метан, етан, пропан та інші легкі вуглеводні. З метою контролю температури рідини необхідно встановити термометр (ТР). Через підвищення температури рідини та подачі водню до закритої камери установки, де обробляється нафтопродукт буде відбуватись підвищення тиску, саме тому необхідно передбачити запобіжний клапан (КТ) та манометр (МН) для



а *б*

Рис. 4. *а* – Епюра звукового тиску у циліндричній камері при збуджені радіальної моди коливань; *б* – Візуалізація кавітаційної області у центральній частині камери, що спостерігається через торцеве скло [21]

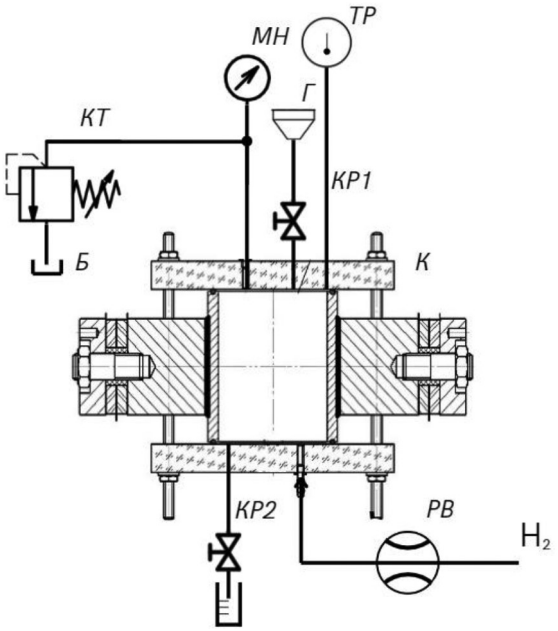


Рис. 5. Схема установки для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів

контролю тиску. Для створення даної установки попередньо було розроблено гідравлічну схему, яка представлена на рисунку 5.

Спираючись на запропоновано схему були виготовлені елементи установки, які давали можливість встановити необхідне вимірювальне обладнання на ультразвукову кавітаційну камеру та місця для підводу та зливу робочої рідини. Отвір для подачі водневого газу розміщено в нижній частині установки з метою спрощення заповнення всього об'єму робочої камери. Конструкція установки забезпечує легкий доступ до робочої камери, що дозволяє проводити очистку її внутрішніх поверхонь від залишків нафтопродуктів. Розроблений демонстраційний стенд представлено на рисунку 6.

Для перевірки працездатності розробленої нами установки необхідно визначити кількість легких вуглеводнів в обробленій рідині. Для цього, необхідно розділити її на фракції методом перегону.

Перегоном нафти називають процес її термічного розділення на частини (фракції) без помітного розкладання вуглеводнів, що входять до складу нафти. Даний процес оснований на властивості вуглеводнів, які входять до складу нафти, виділення пари певної пружності за певних значень температури. При збільшені температури нафти, що переганяється, відбувається підвищення пружності пари над нею, в момент коли вона досягає значення тиску, який дорівнює або перевищує тиск навколишнього середовища, відбувається рух частинок пари у простір із меншим тиском. Пара, яка виходить із нагрівального апарата, охолоджується, відбувається процес конденсації, створюючи розрідження. Це дозволяє більш висококиплячим частинам суміші, що переганяється відділитись.

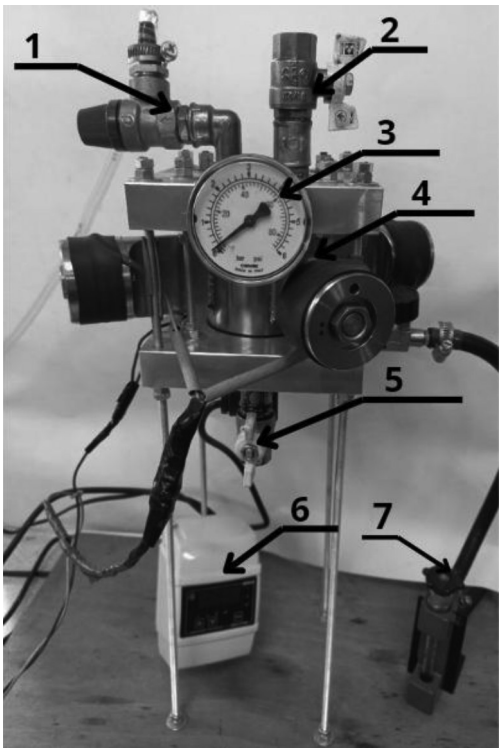


Рис. 6. Установка для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів (1 – клапан тиску, 2 – заливна горловина, 3 – манометр, 4 – кавітаційна камера, 5 – зливний кран, 6 – датчик температури, 7 – регулятор витрати)

Тобто відбувається безупинний процес переміщення пари із простору, який нагрівається, до охолоджуваного середовища, який продовжується до повного перегону рідини. Зазвичай нафту переганяють на наступні фракції: бензинову, що википає до 170–200 °С; гасову, що википає від 175 до 270 °С; газойлеву – 270–350 °С і кубовий залишок-мазут. У лабораторній практиці застосовують перегонку нафти з поступовим випарюванням в для одержання точного розділення великої кількості фракцій [7].

Проведений аналіз літератури по створенню перегонних установок в лабораторних умовах (рис. 7) [22] дозволив визначитись з параметрами і характеристиками необхідного обладнання, на основі якого було виготовлено установку представлену на рисунку 8.

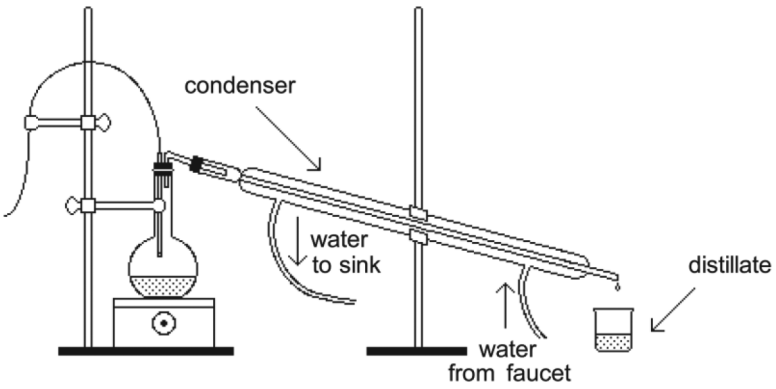


Рис. 7. Схема пристрою для фракційної перегонки рідких речовин [22]

Дана установка оснащена колбонагрівачем LTHS 2000, який дозволяє виконати плавний нагрів рідини до 400 °С, що повністю відповідає необхідному значенню температури для розділення нафтопродуктів на фракції. Для роботи з обробленою рідиною використовуємо перегінну колбу об’ємом 100 мл, термометром з межею вимірювання до 400 °С та кульковим, проточним холодильником.

Підготовлене нами обладнання буде використано для проведення майбутніх досліджень з кавітаційного гідрування будь яких типів важких нафтопродуктів. В подальших дослідженнях ми плануємо розширити спектр

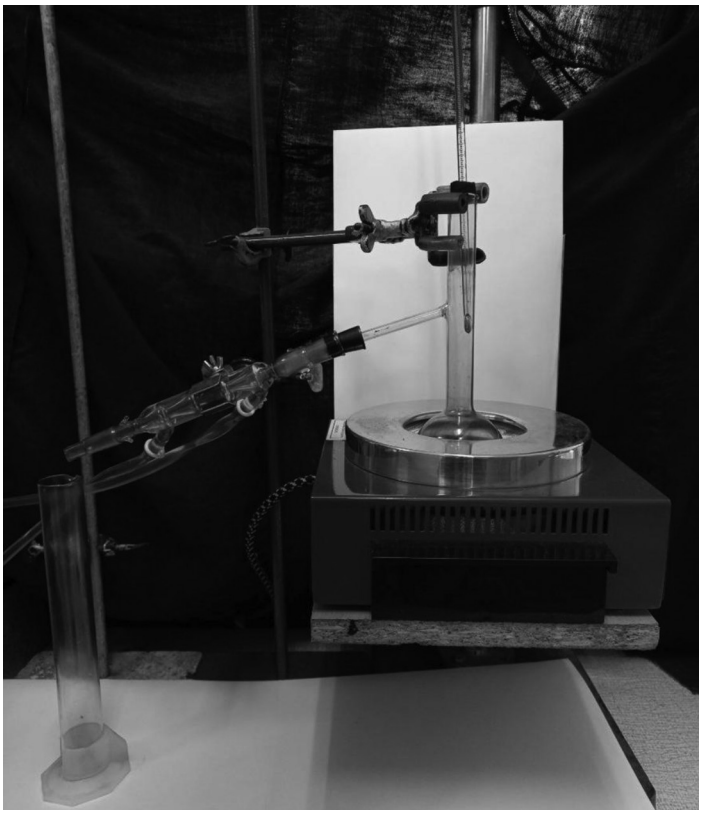


Рис. 8. Пристрій для фракційної перегонки рідких речовин

досліджуваних параметрів, таких як визначення оптимальної кількості водню для різних типів нафтопродуктів, варіації тиску та температури, а також оптимізувати ультразвукові характеристики для максимального підвищення продуктивності установки. Особливу увагу буде приділено дослідженню можливостей зниження енерговитрат і підвищенню виходу світлих фракцій, що є важливими економічними показниками.

Висновки

Проведено аналіз відомих методів переробки важких нафтопродуктів, а саме каталітичного розщеплення, термохімічного методу, зневоднення з подальшим захороненням сухих залишків та визначено їх недоліки.

Розглянуто принцип роботи установки для ультразвукового крекінгу вуглеводневих сполук, на основі чого було створено установку для кавітаційного гідрування важких нафтопродуктів на базі ультразвукового трубчастого кавітатора. Він дозволяє здійснити концентрацію ультразвукової енергії у центральній частині циліндричної камери та має більшу область обробки робочої рідини, що дозволяє досягти більш ефективного розщеплення молекул вуглеводнів.

Реалізована установка для фракційної перегонки рідких речовин з метою визначення кількості світлих фракцій після проведення обробки важких нафтопродуктів. Дана установка дозволяє здійснювати розділення компонентів нафтопродуктів на різні фракції, такі як бензин, гас, дизель та інші. Використання перегонного пристрою дає можливість оперативно здійснювати перевірку та обробку результатів кавітаційного гідрування. Це забезпечує можливість швидкого внесення коректив до параметрів кавітаційної установки, що сприяє вдосконаленню методів переробки.

Список використаної літератури

1. Suas, F., Safri, A., & Benmouna, A. (2021). Review on rheology of heavy crude oil for pipeline transportation. Oil Research, 6, 116–136. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001

2. Rana, M.S., Sámano, V., Ancheyta, J., & Diaz, J.A.I. (2007). Review of recent technological advances for upgrading heavy oils and residues. Fuel, 86, 1216–1231. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.013

3. Топільницький, П.І., Романчук, В.В., Ярмола, Т.В., Зінченко, Д.В. (2020). Фізико-хімічні властивості важких нафт Яблунівського родовища з високим вмістом сірки. Вісник НУ «Львівська політехніка»: Хімія, технологія речовин та їх застосування, 3, 75–82. https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.075

4. Prasad, S.K., Kakati, A., & Sangwai, J.S. (2020). Rheology of heavy crude oil and asphaltene-polymer composite blends. In S. Thomas, C. Sarathchandran, & N. Chandran (Eds.), Rheology of polymer blends and nanocomposites (pp. 161–192). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816957-5.00008-2

5. Meyer, R. F., & Attanasi, E. D. (2003). Heavy oil and natural bitumen – Strategic petroleum resources. USGS Fact Sheet, 3. https://doi.org/10.3133/fs0700

6. Santos, R. G., Loh, W., Bannwart, A. C., & Trevisan, O. V. (2014). An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31, 571–590. https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853

7. Саранчук, В. І., Іляшов, М. О., Ошовський, В. В., & Білецький, В. С. (2008). Хімія і фізика горючих копалин. Донецьк : Східний видавничий дім.

8. Sun, J., Yu, H., Yin, Z., Jiang, L., Wang, L., Hu, S., & Zhou, R. (2023). Simulation and optimization process of rich gas compression and absorption stabilization of the fluid catalytic cracking unit. Processes, 11(7), 2140. https://doi.org/10.3390/pr11072140

9. Білецький, В. С., Бойко, В. С., & Букін, С. Л. (2007). Мала гірнича енциклопедія, т. 2. Донецьк : Донбас.

10. Dufour, J., Serrano, D. P., Gálvez, J. L., Moreno, J., & García, C. (2011). Syngas from hydrocarbon liquids via supercritical water gasification. Applied Catalysis B: Environmental, 108–109, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.07.036

11. Durak, H. (2023). Comprehensive assessment of thermochemical processes for sustainable waste management and resource recovery. Processes, 11(7), 2092. https://doi.org/10.3390/pr11072092

12. Склабінський, В. І., Ляпощенко, О. О., & Артюхов, А. Є. (2011). Технологічні основи переробки нафти і газу. Суми : Сумський державний університет.

13. Wang, J., Huang, J., Cao, J., & Fu, L. (2019). Challenges and advances in the dewatering of oil sludge: A review. Fuel, 252, 813–825. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.118

14. Zeng, G., Zhang, Y., Huang, G., Yu, M., & Fang, W. (2007). Treatment and recycling of oily sludge. Journal of Hazardous Materials, 151(2–3), 254–261. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.020

15. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of the oxidation process of coal and biomass blends using TG and FTIR. Fuel, 82(15–17), 1955–1961. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00147-6

16. Шевчук, В. Я., Чеботко, К. О., & Розгуляєв, В. М. (2001). Біотехнологія отримання органо-мінеральних добрив із вторинної сировини. Київ : ІСД МО.

17. Liu, J., Wu, Y., Chen, S., & Li, L. (2014). Techno-economic analysis of oil sludge treatment by pyrolysis and dewatering. Energy Conversion and Management, 88, 944–951. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.003

18. Petroleum refining. (2024). Encyclopaedia Britannica. Retrieved from https://www.britannica.com/technology/petroleum-refining (accessed June 5, 2024).

19. Войтович, О. В. (2014). Ультразвукова установка для гідрокрекінгу вуглеводнів (UA92137U). Retrieved from https://patents.google.com/patent/UA92137U/en

20. Гришко, І. А., Новосад, А. А., & Луговський, О. Ф. (2014). Дослідження робочої зони проточного трубчастого кавітатора з високою інтенсивністю ультразвукових коливань. Промислова гідравліка і пневматика, 2, 9–15.

21. Луговський, О., Зілінський, А., Шульга, А., Лавриненков, А., Гришко, І., & Берник, І. (2020). Експериментальне дослідження стійкості конструкційних матеріалів до кавітаційної ерозії. Механіка та передові технології, 3(90), 29–33.

22. Randall, J., Espinoza, R. L. S., Lewandowski, S. L., Freeman, D., Ragsdale, R., & Thomas, N. (2017). Organic chemistry with Vernier. Beaverton, OR: Vernier Software & Technology. Retrieved from https://www.vernier.com/product/organic-chemistry-with-vernier

References

1. Suas, F., Safri, A., & Benmouna, A. (2021). Review on rheology of heavy crude oil for pipeline transportation. Oil Research, 6, 116–136. https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2020.11.001

2. Rana, M. S., Sámano, V., Ancheyta, J., & Diaz, J. A. I. (2007). Review of recent technological advances for upgrading heavy oils and residues. Fuel, 86, 1216–1231. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2007.01.013

3. Topilnytskyy, P. I., Romanchuk, V. V., Yarmola, T. V., & Zinchenko, D. V. (2020). Fizyko-khimichni vlastyvosti vazhkykh naft Yablunivskoho rodovyshcha z vysokym vmistom sirky [Physico-chemical properties of heavy oils of the Yabluniv field with high sulfur content]. Visnyk NU "Lvivska Politekhnika": Khimiya, Tekhnolohiya Rechovyn ta Yikh Zastosuvannya, 3, 75–82. https://doi.org/10.23939/ctas2020.01.075 (in Ukrainian)

4. Prasad, S. K., Kakati, A., & Sangwai, J. S. (2020). Rheology of heavy crude oil and asphaltene-polymer composite blends. In S. Thomas, C. Sarathchandran, & N. Chandran (Eds.), Rheology of polymer blends and nanocomposites (pp. 161–192). Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816957-5.00008-2

5. Meyer, R. F., & Attanasi, E. D. (2003). Heavy oil and natural bitumen – Strategic petroleum resources. USGS Fact Sheet, 3. https://doi.org/10.3133/fs0700

6. Santos, R. G., Loh, W., Bannwart, A. C., & Trevisan, O. V. (2014). An overview of heavy oil properties and its recovery and transportation methods. Brazilian Journal of Chemical Engineering, 31, 571–590. https://doi.org/10.1590/0104-6632.20140313s00001853

7. Saranchuk, V. I., Ilyashov, M. O., Oshovskyi, V. V., & Biletskyi, V. S. (2008). Khimia i fizyka horiuchykh kopalyn [Chemistry and physics of fossil fuels]. Donetsk: Skhidnyi Vydavnychyi Dim. (in Ukrainian)

8. Sun, J., Yu, H., Yin, Z., Jiang, L., Wang, L., Hu, S., & Zhou, R. (2023). Simulation and optimization process of rich gas compression and absorption stabilization of the fluid catalytic cracking unit. Processes, 11(7), 2140. https://doi.org/10.3390/pr11072140

9. Biletskyi, V. S., Boiko, V. S., & Bukin, S. L. (2007). Mala hirnycha entsyklopediia, t. 2 [Small mining encyclopedia, Vol. 2]. Donetsk: Donbas. (in Ukrainian)

10. Dufour, J., Serrano, D. P., Gálvez, J. L., Moreno, J., & García, C. (2011). Syngas from hydrocarbon liquids via supercritical water gasification. Applied Catalysis B: Environmental, 108–109, 40–49. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2011.07.036

11. Durak, H. (2023). Comprehensive assessment of thermochemical processes for sustainable waste management and resource recovery. Processes, 11(7), 2092. https://doi.org/10.3390/pr11072092

12. Sklabinskyi, V. I., Lyaposhchenko, O. O., & Artyukhov, A. E. (2011). Tekhnolohichni osnovy pererobky nafty i hazu [Technological fundamentals of oil and gas processing]. Sumy: Sumskyi Derzhavnyi Universytet. (in Ukrainian)

13. Wang, J., Huang, J., Cao, J., & Fu, L. (2019). Challenges and advances in the dewatering of oil sludge: A review. Fuel, 252, 813–825. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.04.118

14. Zeng, G., Zhang, Y., Huang, G., Yu, M., & Fang, W. (2007). Treatment and recycling of oily sludge. Journal of Hazardous Materials, 151(2–3), 254–261. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.02.020

15. Franco, C., Pinto, F., Gulyurtlu, I., & Cabrita, I. (2003). The study of the oxidation process of coal and biomass blends using TG and FTIR. Fuel, 82(15–17), 1955–1961. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00147-6

16. Shevchuk, V. Ya., Chebotko, K. O., & Rozguliaiev, V. M. (2001). Biotekhnolohiia otrymannia orhano-mineralnykh dobryv iz vtorynnoi syrovyny [Biotechnology of obtaining organomineral fertilizers from secondary raw materials]. Kyiv: ISD MO. (in Ukrainian)

17. Liu, J., Wu, Y., Chen, S., & Li, L. (2014). Techno-economic analysis of oil sludge treatment by pyrolysis and dewatering. Energy Conversion and Management, 88, 944–951. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.10.003

18. Petroleum refining. (2024). Encyclopaedia Britannica. Retrieved from https://www.britannica.com/technology/petroleum-refining (accessed June 5, 2024).

19. Voitovich, O. V. (2014). Ultrazvukova ustanovka dlia hidrokrakinhvu vuhevodeniv [Ultrasonic hydrocarbon cracking unit] (UA92137U). Retrieved from https://patents.google.com/patent/UA92137U/en (in Ukrainian)

20. Hryshko, I. A., Novosad, A. A., & Luhovskyi, O. F. (2014). Doslidzhennia robochoi zony protochnoho trubchastoho kavitatora z vysokoiu intensyvnistiu ultrazvukovykh kolyvan [Study of the working area of a flow tubular cavitator with high-intensity ultrasonic vibrations]. Promyslova Hidravlika i Pnevmatyka, 2, 9–15. (in Ukrainian)

21. Luhovskyi, O., Zilinskyi, A., Shulha, A., Lavrynenkov, A., Hryshko, I., & Bernyk, I. (2020). Experimental study of structural materials resistance to cavitation erosion. Mechanics and Advanced Technologies, 3(90), 29–33. (in Ukrainian)

22. Randall, J., Espinoza, R. L. S., Lewandowski, S. L., Freeman, D., Ragsdale, R., & Thomas, N. (2017). Organic chemistry with Vernier. Beaverton, Oregon: Vernier Software & Technology. Retrieved from https://www.vernier.com/product/organic-chemistry-with-vernier

УДК 621.37 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.5

Л. В. ВАХОНІНА
кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1668-2275

В. А. МАРДЗЯВКО
асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-7327-9215

А. Ю. РУДЕНКО
асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки
Миколаївський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-5103-6412

РЕЗОНАНСНИЙ ГЕНЕРАТОР ІМПУЛЬСІВ НА ОСНОВІ ДІОДА

Забезпечення якісного зберігання зерна є важливим завданням агропромислового комплексу, оскільки патогенні мікроорганізми, комахи та інші шкідники можуть значно впливати на його якість і спричиняти значні втрати. Традиційні методи знезараження, такі як хімічна обробка або термічний вплив, мають низку недоліків, зокрема можливість залишкових хімічних сполук або теплового пошкодження зерна. У зв'язку з цим перспективним напрямом є використання електромагнітних імпульсів високої частоти, що дозволяють ефективно знищувати патогени без шкоди для продукту.

У цій роботі розглядається розробка резонансного генератора імпульсів на основі діода як основного нелінійного елемента, що дозволяє генерувати імпульси високої частоти та амплітуди. Досліджується застосування напівпровідникових діодів із негативним диференціальним опором (тунельних та Ганн-діодів), які здатні підтримувати автоколивання у резонансному коливальному контурі. Це дозволяє створювати ефективні електромагнітні імпульси для використання в технологіях знезараження зерна та інших аграрних процесах.

У роботі проведено математичне моделювання роботи резонансного генератора, яке враховує його електрофізичні характеристики, взаємодію елементів коливального контуру (індуктивності, ємності) та нелінійні властивості діода. Запропоновано диференціальне рівняння, що описує динаміку генерації імпульсів у такій системі. Використано чисельні методи розв'язку, зокрема метод Рунге-Кутти, для аналізу поведінки струму та напруги в контурі.

Результати моделювання показують, що такий генератор забезпечує стабільну генерацію імпульсів із заданими параметрами. Аналіз часових та спектральних характеристик сигналу підтвердив ефективність використання діода як нелінійного елемента для підтримки автоколивань. Крім того, отримані графіки струму та напруги в контурі свідчать про можливість практичного використання такої системи у високочастотних застосуваннях, зокрема для знезараження зерна.

Запропонована модель може бути використана для подальших досліджень та оптимізації параметрів генератора імпульсів. Використання таких пристроїв у сільському господарстві відкриває нові можливості для екологічно чистого знезараження продукції без використання хімічних реагентів, що робить їх привабливими для агропромислових підприємств.

Ключові слова: *резонансний генератор імпульсів, знезараження зерна, високочастотні імпульси, LC-контур, тунельний діод, Ганн-діод, динаміка коливань, імпульсна електромагнітна обробка.*

L. V. VAKHONINA
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Associate Professor at the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1668-2275

V. A. MARDZIAVKO
Assistant at the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-7327-9215

A. YU. RUDENKO
Assistant at the Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics
Mykolaiv National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-5103-6412

DIODE-BASED RESONANT PULSE GENERATOR

Ensuring high-quality grain storage is an important task of the agro-industrial complex, since pathogenic microorganisms, insects and other pests can significantly affect its quality and cause significant losses. Traditional methods of disinfection, such as chemical treatment or thermal exposure, have a number of disadvantages, in particular the possibility of residual chemical compounds or thermal damage to the grain. In this regard, a promising direction is the use of high-frequency electromagnetic pulses, which allow for the effective destruction of pathogens without harm to the product.

This work considers the development of a resonant pulse generator based on a diode as the main nonlinear element, which allows generating high-frequency and amplitude pulses. The use of semiconductor diodes with negative differential resistance (tunnel and Gunn diodes) is investigated, which are capable of supporting self-oscillations in a resonant oscillatory circuit. This allows creating effective electromagnetic pulses for use in grain disinfection technologies and other agricultural processes.

The work presents a mathematical simulation of the operation of a resonant generator, which takes into account its electrophysical characteristics, the interaction of the elements of the oscillatory circuit (inductance, capacitance) and the nonlinear properties of the diode. A differential equation is proposed that describes the dynamics of pulse generation in such a system. Numerical solution methods, in particular the Runge-Kutta method, are used to analyze the behavior of current and voltage in the circuit.

The simulation results show that such a generator provides stable pulse generation with specified parameters. Analysis of the time and spectral characteristics of the signal confirmed the effectiveness of using a diode as a nonlinear element to support self-oscillations. In addition, the obtained current and voltage graphs in the circuit indicate the possibility of practical use of such a system in high-frequency applications, in particular for grain disinfection.

The proposed model can be used for further research and optimization of the pulse generator parameters. The use of such devices in agriculture opens up new opportunities for environmentally friendly disinfection of products without the use of chemical reagents, which makes them attractive for agro-industrial enterprises.

Key words: *resonant pulse generator, grain disinfection, high-frequency pulses, LC circuit, tunnel diode, Gunn diode, oscillation dynamics, pulsed electromagnetic processing.*

Постановка проблеми

Забезпечення якісного зберігання зерна є однією з ключових задач агропромислового комплексу. Однією з основних проблем є наявність патогенних мікроорганізмів, комах і шкідників, які можуть призводити до значних втрат продукції та погіршення її якості. Традиційні методи знезараження зерна, такі як хімічна обробка або термічна дія, мають ряд недоліків, зокрема залишкові хімічні сполуки, що можуть негативно впливати на здоров'я людини, або теплове пошкодження зерна, що змінює його поживні властивості.

Одним із перспективних рішень цієї проблеми є використання резонансних генераторів імпульсів, які генерують короткі високочастотні електромагнітні імпульси для ефективного знезараження зерна без використання хімічних реагентів.

Резонансний генератор імпульсів для знезараження зерна – це пристрій, що генерує короткі високочастотні електромагнітні імпульси, які використовуються для боротьби з патогенними мікроорганізмами, комахами та іншими шкідниками в зерні [1]. Основна ідея цієї технології полягає у використанні фізичних властивостей електромагнітних хвиль для створення несприятливих умов для життя мікроорганізмів, зберігаючи при цьому поживні та фізичні властивості самого зерна.

Найбільш зручним технологічним рішенням є використання резонансного генератора імпульсів на основі діода для розмикання ланцюгів рис. 1 [2].

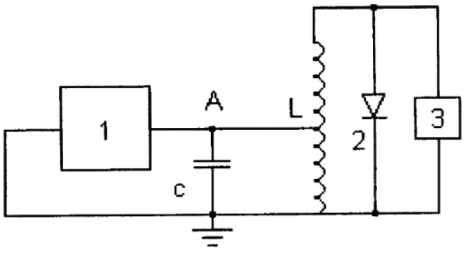


Рис. 1. Принципова електрична схема резонансного генератора імпульсів на основі діода: 1 – генератор синусоїдальної напруги; 2 – діод; 3 – навантаження

Резонансні генератори імпульсів, що базуються на нелінійних властивостях напівпровідникових діодів, є важливими елементами в сучасній електроніці, особливо у високочастотних застосуваннях. Використання діодів з негативним диференціальним опором, таких як тунельні або Ганн-діоди, дозволяє створювати короткі імпульси з високою частотою та амплітудою. Ці генератори знаходять широке застосування у НВЧ-техніці [3, 4], системах зв'язку, радіолокації та імпульсних джерелах живлення завдяки своїй здатності ефективно генерувати імпульси без складних схем живлення.

Основним компонентом таких генераторів є коливальний контур, який складається з індуктивності та ємності, а також діода, що забезпечує необхідну нелінійність для підтримки генерації імпульсів. Тобто в основі такого генератора лежить принцип коливального контуру, який здатний генерувати високочастотні коливання.

Генератори такого типу використовуються для створення високочастотних імпульсів у радіолокації, генерації надкоротких імпульсів у телекомунікаціях та НВЧ-техніці, де необхідні стабільні і короткі імпульси для передачі або обробки сигналів [5, 6].

Цей принцип роботи дозволяє ефективно генерувати імпульси за допомогою порівняно простих електронних компонентів, використовуючи резонансні властивості контуру та особливості діодів.

Попри значний потенціал цієї технології, дослідження ефективності та оптимізації роботи резонансних генераторів імпульсів у контексті знезараження зерна є недостатньо розвиненим напрямком. Зокрема, необхідне детальне математичне моделювання роботи таких генераторів, аналіз їхніх електрофізичних характеристик, а також оцінка впливу параметрів генератора на ефективність імпульсного знезараження.

Таким чином, постає необхідність у розробці математичних моделей та проведенні чисельного моделювання роботи резонансного генератора імпульсів на основі діода, що дозволить оцінити його ефективність та визначити оптимальні параметри роботи для аграрної сфери та інших високочастотних застосувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження у сфері використання резонансних генераторів імпульсів для знезараження зерна демонструють перспективність цього методу. Зокрема, в роботі, представленій у [7, 8], було розроблено резонансний генератор високих напруг для обробки зерна, зараженого грибковою культурою. За допомогою цифрової мікроскопії було зафіксовано руйнування структури грибкових утворень після обробки. Інше дослідження [9] описує експериментальне вивчення процесів у розрядному колі потужної високовольтної імпульсної установки з трьома багатозазорними розрядниками, що працюють паралельно. Отримані осцилограми імпульсів напруги та струму на навантаженні у вигляді трьох реакторів з проточною водою свідчать про ефективність такої установки для знезараження.

Також варто відзначити дослідження, в якому використовувався мікрохвильовий генератор на частоті 2,45 ГГц для обробки зерна. Результати показали, що 15-хвилинна обробка мікрохвилями забезпечує знищення понад 90 % спор грибів родів Aspergillus та Fusarium [10].

Ці дослідження підкреслюють ефективність використання високочастотних імпульсних генераторів для знезараження зерна, що дозволяє зменшити використання хімічних засобів та зберегти якість продукції.

Формулювання мети дослідження

Метою цієї роботи є математичне моделювання та аналіз поведінки резонансного генератора імпульсів, що базується на LC-контурі з використанням діода як нелінійного елемента.

Викладення основного матеріалу дослідження

У випадку резонансного генератора імпульсів діод виконує специфічну роль, що відрізняється від його звичайного використання. У цьому випадку використовуються діоди з особливими властивостями, такими як тунельні діоди або діоди Ганна, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику і можуть демонструвати негативний диференціальний опір.

Ця властивість означає, що при збільшенні напруги через діод струм через нього спочатку збільшується, а потім зменшується на певному відрізку кривої. Це створює умови для виникнення автоколивань у резонансному контурі:

– тунельний діод має область, в якій струм зменшується при збільшенні напруги, що сприяє підтримці нестійкого стану та запуску генерації (рис. 2, *в*) [11];

– діод Ганна використовується для генерації НВЧ-коливань завдяки ефекту перенесення заряду, що створює умови для високочастотних коливань (рис. 2, *б*) [11].

Діод у резонансному генераторі виконує ключову роль у запуску, підтримці та обмеженні коливань: на початковому етапі, під дією поданої напруги, він пропускає струм і переходить у режим негативного опору, що стимулює ріст коливань у контурі. Під час роботи генератора діод забезпечує підтримку коливань завдяки контролю фази та амплітуди, підтримуючи енергію системи та запобігаючи затуханню завдяки своїм властивостям негативного опору. Як тільки струм або напруга через діод переходять певну межу, він виходить з режиму негативного опору, що викликає спад коливань і перехід до розрядження контуру. У процесі формування імпульсу, діод сприяє швидкому наростанню напруги, що дозволяє створити чіткий імпульс. Коли амплітуда досягає пікового значення,

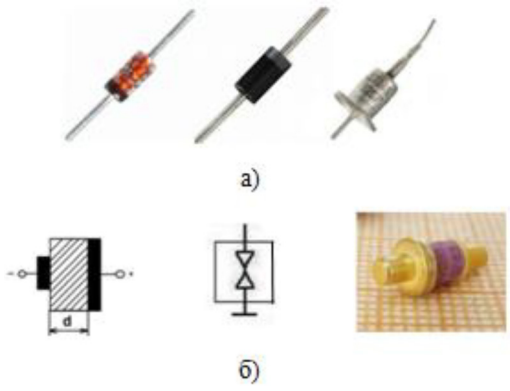


Рис. 2. Види діодів: *а*) – тунельні діоди, *б*) – діоди Ганна

діод змінює свій режим роботи, що спричиняє затухання коливань та підготовку контуру до нового циклу формування імпульсу.

Нелінійні властивості діодів є ключовим фактором для створення імпульсів у резонансних генераторах та інших високочастотних пристроях. Для моделювання нелінійної поведінки діода можна використати рівняння:

$$I_D(V) = I_S \cdot \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1\right), \tag{1}$$

де I_S – зворотний насичений струм, n – коефіцієнт ідеальності, V_T – тепловий потенціал.

Нелінійні властивості діодів, такі як негативний диференціальний опір, тунельний ефект і ефект Ганна, дозволяють діодам функціонувати як генератори, модулятори та підтримувачі коливань, що забезпечує створення імпульсів у коливальних контурах.

У режимі негативного опору діоди підтримують автоколивання, сприяючи зростанню та підтримці імпульсів без зовнішнього втручання. Тунельні діоди використовують квантове тунелювання для формування коротких високочастотних імпульсів, тоді як діоди Ганна завдяки ефекту переносу електронів генерують НВЧ-коливання [12]. Ці властивості дозволяють застосовувати діоди у генераторах імпульсів, модуляторах сигналів та мікрохвильових генераторах.

Діод також відіграє роль у стабілізації роботи генератора, оскільки його характеристики впливають на форму та стабільність імпульсів. Негативний опір діода дозволяє підтримувати автоколивання з мінімальними втратами енергії, що важливо для ефективності генератора.

Отже, діод у резонансному генераторі імпульсів є ключовим компонентом, який запускає, підтримує і обмежує коливання за рахунок своєї нелінійної вольт-амперної характеристики та режиму негативного диференціального опору.

Математичний опис роботи діода в резонансному генераторі імпульсів, де використовуються його нелінійні властивості, ґрунтується на моделюванні вольт-амперної характеристики (рис. 3) та поведінки в електричному коливальному контурі.

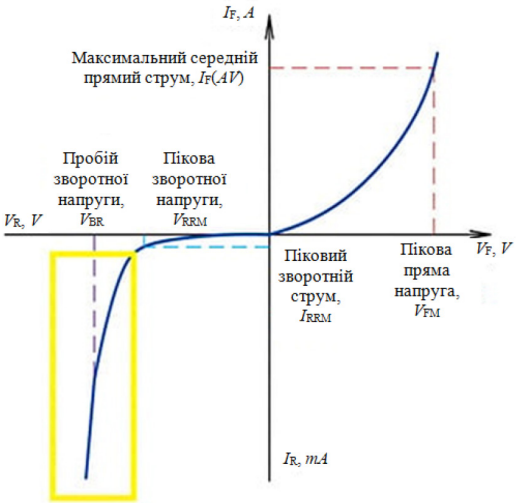


Рис. 3. Вольт-амперної характеристика діода Ганна

Вольт-амперна характеристика діода описує залежність струму I від напруги V на діоді, де для діодів з нелінійними властивостями, зокрема діодів Ганна, ця залежність має специфічну форму, що враховує їх нелінійні електричні властивості, які можна описати рівнянням:

$$I_D(V) = I_0 \cdot \left(e^{\frac{V}{nV_T}} - 1\right) - \alpha V + \beta V^3, \tag{2}$$

де I_0 – насичений зворотний струм, q – заряд електрона, k – стала Больцмана, T – абсолютна температура, α, β – коефіцієнти, що описують нелінійні компоненти характеристики (коефіцієнти лінійного та нелінійного опору).

Для опису режиму негативного диференціального опору використовується похідна струму по напрузі:

$$R_{diff} = \frac{dV}{dI}. \tag{3}$$

У випадку негативного диференціального опору $R_{diff} < 0$, що означає, що при збільшенні напруги струм зменшується. Це дозволяє підтримувати автоколивання в контурі.

Коливальний контур із підключеним діодом можна описати диференціальним рівнянням:

$$L\frac{d^2i(t)}{dt^2} + R\frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C}\int i(t)dt = V_D\left(i(t)\right), \tag{4}$$

де L – індуктивність, R – активний опір контуру, C – ємність, $V_D(i(t))$ – нелінійна функція, що задає напругу на діоді залежно від струму через нього.

Модель діода з негативним опором описує нелінійні властивості діода, де його опір змінюється залежно від напруги. Для математичного моделювання цієї нелінійності часто застосовують кубічну функцію, яка наближено відображає зміну опору діода при різних значеннях напруги, враховуючи його здатність до виникнення негативного опору при певних умовах:

$$V_D(i) = V_0 - \alpha i + \beta i^3, \tag{5}$$

де V_0 – порогова напруга діода, що відповідає переходу в режим негативного опору.

До зазначених умов, можна віднести резонансні умови, які необхідні для підтримки коливань де контур має працювати на частоті, яка близька до резонансної. Це забезпечує максимальний ефект від взаємодії між елементами контуру, таких як індуктивність і ємність, що дозволяє досягти найбільш ефективного коливання при мінімальних енергетичних витратах.

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} \gg 1, \tag{6}$$

де Q – добротність контуру, ω_0 – кутова частота, що відповідає резонансній частоті:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \tag{7}$$

де індуктивності L і ємності C, які утворюють резонансну частоту.

Спектральний аналіз імпульсів передбачає подання вихідного сигналу як періодичної функції, яка розкладається в ряд Фур'є:

$$V_{out}(t) = \sum_n A_n \sin(n \cdot \omega_0 \cdot t + \phi_n), \tag{8}$$

де A_n і φ_n – амплітуди і фази гармонік, що залежать від нелінійності діода.

Це дозволяє представити сигнал у вигляді суми гармонік із різними частотами, амплітудами та фазами, що забезпечує детальне вивчення його частотних характеристик та аналіз енергетичного розподілу в спектрі.

Цей математичний опис дозволяє зрозуміти, як саме нелінійні властивості діода впливають на роботу резонансного генератора імпульсів і створення високочастотних коливань.

Принцип роботи резонансного генератора імпульсів на основі діода базується на використанні резонансного коливального контуру, доповненого діодом із нелінійними характеристиками, який забезпечує генерацію імпульсів. Нижче наведено докладний опис цього принципу.

На початку роботи генератора при подачі живлення відбувається заряджання коливального контуру, і струм починає протікати через діод. Коли напруга досягає порогового значення, діод переходить у режим негативного опору, що викликає виникнення зворотного зв'язку та ініціює коливання в контурі. Під час фази генерації імпульсів у коливальному контурі відбувається поступове зростання напруги й струму, а діод переходить у режим негативного опору, що посилює коливання і сприяє утворенню імпульсу. Коли амплітуда імпульсу досягає максимуму, діод змінює свій режим на позитивний опір, що призводить до зменшення струму і поступового розрядження

контуру, завершуючи коливальний цикл. Після завершення циклу генерації контур повертається до свого початкового стану, де процес зарядки починається знову, і весь цикл повторюється. Це забезпечує періодичну генерацію імпульсів. Стабільна генерація імпульсів забезпечується правильним вибором параметрів коливального контуру і характеристик діода, які повинні відповідати умовам підтримки автоколивань. Важливу роль відіграє висока добротність контуру Q, що мінімізує енергетичні втрати, а також оптимальні значення критичної напруги та струму діода, які забезпечують стабільний перехід між режимами негативного і позитивного опору.

Вихідний сигнал резонансного генератора є періодичною послідовністю імпульсів, форма і частота яких визначаються параметрами коливального контуру та діода. Частота імпульсів відповідає резонансній частоті контуру, тоді як амплітуда залежить від характеристик діода, таких як критична напруга і струм, а також від умов живлення.

Математична модель резонансного генератора імпульсів на основі діода може бути описана системою рівнянь, яка враховує динамічні властивості елементів схеми, таких як індуктивності, ємності та нелінійний елемент – діод. Така схема зазвичай включає резонансний контур (*LC*), в якому діод використовується для створення нелінійності, що генерує імпульси.

Роботу резонансного генератора можна описати за допомогою системи рівнянь, що враховує взаємодію індуктивності, ємності та нелінійної характеристики діода. Ось як можна математично описати роботу такої системи:

1. Напруга на контурі визначається рівнянням:

$$L\frac{dI(t)}{dt}+V_C(t)=0, \tag{9}$$

де L – індуктивність, $I(t)$ – струм у контурі, $V_C(t)$ – напруга на ємності.

2. Рівняння для ємності:

$$C\frac{dV_C(t)}{dt}=I(t)-I_D\left(V_C(t)\right), \tag{10}$$

де C – ємність, $I_D(V_C(t))$ – струм через діод.

3. Нелінійна характеристика діода задається рівнянням для струму через діод (1), що дасть нам моделювання поведінки діода. Задопомогою цього рівняння виконається опис експоненційної залежності струму через діод від напруги на ньому, що відображає його нелінійну природу.

Підставивши вираз для $I_D(V_C(t))$ у рівняння для ємності, отримуємо повну модель системи:

$$C\frac{dV_C(t)}{dt}=I(t)-I_S\left(e^{\frac{V_C(t)}{nV_T}}-1\right), \tag{11}$$

та рівняння для струму в індуктивності:

$$L\frac{dI(t)}{dt}=-V_C(t). \tag{12}$$

В результаті, система з двох зв'язаних диференціальних рівнянь першого порядку, що описує роботу генератора, має вигляд:

$$\begin{cases}\dfrac{dI(t)}{dt}=-\dfrac{V_C(t)}{L}\\ \dfrac{dV_C(t)}{dt}=\dfrac{I(t)}{C}-\dfrac{I_S}{C}\left(e^{\frac{V_C(t)}{nV_T}}-1\right)\end{cases}. \tag{13}$$

Ці рівняння разом утворюють повну математичну модель системи, яка описує динаміку роботи резонансного генератора імпульсів (взаємодію між індуктивністю, ємністю та струмом через діод, враховуючи його нелінійну характеристику), враховуючи властивості коливального контуру та нелінійність діода.

Аналіз роботи даної системи та її чисельне рішення можна провести за допомогою чисельних методів інтеграції, таких як метод Рунге-Кутти. Ці методи дозволяють отримати часові залежності напруги та струму в коливальному контурі, моделюючи поведінку резонансного генератора імпульсів. Для реалізації чисельного рішення можна використовувати програмне забезпечення MATLAB, яке підтримує інтеграцію диференціальних рівнянь, що дає змогу досліджувати динамічні характеристики системи.

На рис. 4 показано код на мові MATLAB, який реалізує чисельне моделювання роботи резонансного генератора імпульсів із врахуванням нелінійних характеристик діода.

```
>> % Параметри схеми
L = 1e-3; % Індуктивність (Гн)
C = 1e-6; % Ємність (Ф)
I_S = 1e-12; % Зворотний насичений струм (А)
n = 1; % Коефіцієнт ідеальності
V_T = 26e-3; % Тепловий потенціал (В)

% Початкові умови
I0 = 0; % Початковий струм (А)
V0 = 0.5; % Початкова напруга на діоді (В)

% Час симуляції
tspan = [0 0.01]; % Інтервал часу (с)

% Система диференціальних рівнянь
dydt = @(t, y) [
    -y(2) / L; % dI/dt
    (y(1) / C) - (I_S / C) * (exp(y(2) / (n * V_T)) - 1) % dV/dt
];
% Запуск чисельного інтегратора
[t, y] = ode45(dydt, tspan, [I0, V0]);

% Візуалізація результатів
figure;
subplot(2, 1, 1);
plot(t, y(:, 1));
title('Струм у контурі');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Струм (А)');

subplot(2, 1, 2);
plot(t, y(:, 2));
title('Напруга на діоді');
xlabel('Час (с)');
ylabel('Напруга (В)');
>>
```

Рис. 4. Реалізація чисельного моделювання роботи резонансного генератора імпульсів

Основні частини коду:

1. Задання параметрів схеми:

Визначені параметри індуктивності (L), ємності (C), зворотного насиченого струму (I_S), коефіцієнта ідеальності (n) та теплового потенціалу (V_T);

2. Початкові умови:

Початкові значення струму ($I_0 = 0$) і напруги ($V_0 = 0{,}5$) та часовий інтервал симуляції ($t_{span} = [0{,}0.01]$);

3. Система диференціальних рівнянь:

Описано функцію dydt, яка містить два рівняння: для струму через індуктивність і для напруги на ємності, включаючи нелінійний струм через діод;

4. Чисельне розв'язання:

Застосований метод Рунге-Кутти (*ode*45) для інтеграції системи рівнянь, результати зберігаються у змінних t (час) і (значення струму і напруги);

5. Візуалізація результатів:

Виведені два графіки:

– струм у контурі ($I(t)$) як функція часу;
– напруга на діоді ($V_C(t)$) як функція часу;

Цей код дає можливість побудувати графіки струму в контурі та напруги на діоді. Перехідні процеси струму в контурі та напруги на діоді представлені на рис. 5.

На основі проведенного моделювання, представлених на рис. 4, можна зробити наступні висновки:

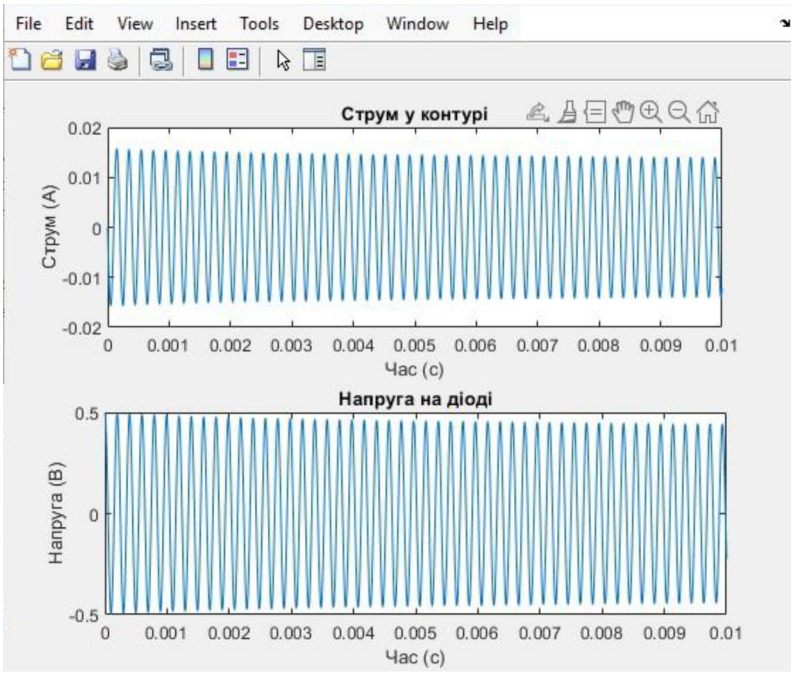


Рис. 5. Перехідні процеси струму в контурі та напруги на діоді резонансного генератора імпульсів

– струм у контурі має коливальний характер, що вказує на наявність резонансних коливань. Це типово для LC-контурів, які можуть підтримувати коливання завдяки накопиченню та передачі енергії між індуктивністю та ємністю;

– амплітуда коливань є стабільною, що свідчить про рівноважний процес без значних втрат або загасання;

– напруга також має коливальний характер і змінюється від позитивних до негативних значень, що вказує на можливі гармонічні процеси, пов'язані з нелінійними властивостями діода;

– якщо діод працює у режимі зміни провідності, це може бути ознакою його дії як перемикача, що створює імпульси.

Висновки

Результати моделювання показали, що струм у контурі та напруга на діоді мають коливальний характер із постійною амплітудою. Це свідчить про ефективну генерацію резонансних коливань у системі. Згідно з графіками, амплітуда сигналів залишається стабільною протягом моделювання, що вказує на те, що втрати в контурі компенсуються нелінійною дією діода.

Струм у контурі демонструє періодичні коливання з незначними коливаннями амплітуди на початку, що поступово переходять у стабільний режим. Напруга на діоді змінюється від позитивних до негативних значень, підтверджуючи ефективну роботу діода у режимі перемикання. Це узгоджується з теоретичними передбаченнями про поведінку діода як нелінійного елемента, що генерує коливання завдяки інжекції та рекомбінації зарядів.

Запропонована модель підтверджує, що використання діодів з їх нелінійними властивостями у резонансних генераторах імпульсів дозволяє забезпечити стабільні коливання. Аналіз результатів показав, що модель є ефективною для вивчення процесів у резонансних системах і може бути використана для подальших досліджень у цій галузі.

Список використаної літератури

1. Дубовенко К. В., Захаров Д. О. Знезараження зернової продукції імпульсним коронним розрядом. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»*. 2012. Т. 967, № 61. С. 139–149.

2. Мардзявко В. А., Руденко А. Теоретичні та практичні аспекти застосування генераторів НВЧ для знезараження зернових культур. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. Т. 90, № 3. С. 85–94. URL: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.11

3. Салам Буссі Е. П., Кассаблі М. Генератор потужних високочастотних пакетних імпульсів струму для живлення ультразвукових електромагнітно-акустичних перетворювачів. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. Т. 43, № 2. С. 88–95.

4. Бойко Н., Макагон А. Високовольтна установка імпульсною потужністю 3 МВт для знезараження води у потоці за допомогою наносекундних розрядів у газових бульках. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 5. С. 80–90. URL: https://doi.org/10.15407/techned2020.05.080

5. Шебанін В. С., Кошкін Д. Л., Захаров Д. О. Технологічна лінія передпосівної обробки насіння зернових в полі високочастотного коронного розряду. *Engineering of nature management Journal*. 2014. № 1. С. 38–43.

6. Дубовенко К. В., Захаров Д. О. Сучасний стан застосування електрофізичних методів бактерицидної та фунгіцидної обробки зернової продукції. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2019. № 1. С. 45–50.

7. Osokina N. Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain. *Scientific horizons*. 2024. Т. 27, № 3. С. 64–72.

8. Nosov G. V., Pustynnikov S. V., Kuleshova E. O. Transformer generator of powerful current pulses. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 2020. № 61. С. 300–306.

9. Руденко А., Кунденко М. Аналіз технології генерації НВЧ випромінення з визначенням адаптивного типу діодів для подальшого конструювання апаратів для знезараження. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. № 3. С. 24–37.

10. Стороженко І., Аркуша Ю. Про підвищення потужності коротких діодів Ганна на основі варізонного InGaPAs. *Вісник харківського національного університету імені В. Н. Каразіна*. 2019. № 31. С. 62–78.

11. Generation of powerful microwave voltage oscillations in a diffused silicon diode / S. K. Lyubutin та ін. *Semiconductors*. 2012. Т. 47, № 5. URL: https://doi.org/10.1134/S1063782613050151

12. Дарзнек С., Любутін С., Рукін С. Генерація мікрохвильових коливань у діоді без основи. *Напівпровідники*. 2012. № 36. С. 599–604. URL: https://doi.org/10.1134/1.1478555

References

1. Dubovenko, K. V., & Zakharov, D. O. (2012). Disinfection of grain products by pulsed corona discharge. *Bulletin of the National Technical University "KhPI", 967*(61), 139–149.

2. Mardzyavko, V. A., & Rudenko, A. (2024). Theoretical and practical aspects of the use of microwave generators for disinfection of grain crops. *Bulletin of the Kherson National Technical University*, 90(3), 85–94. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.11

3. Salam Bussi, E. P., & Kassabli, M. (2019). Generator of powerful high-frequency packet current pulses for powering ultrasonic electromagnetic-acoustic converters. *Methods and Devices of Quality Control*, 43(2), 88–95.

4. Boyko, N., & Makogon, A. (2020). High-voltage installation with a pulse power of 3 MW for water disinfection in the flow using nanosecond discharges in gas bubbles. *Technical Electrodynamics*, (5), 80–90. https://doi.org/10.15407/techned2020.05.080.

5. Shebanin, V. S., Koshkin, D. L., & Zakharov, D. O. (2014). Technological line for pre-sowing treatment of grain seeds in a high-frequency corona discharge field. *Engineering of nature management Journal*, (1), 38–43.

6. Dubovenko, K. V., & Zakharov, D. O. (2019). Current state of application of electrophysical methods of bactericidal and fungicidal treatment of grain products. Bulletin of the National Technical University "KhPI", (1), 45–50.

7. Osokina, N. (2024). Effect of an ultra-high frequency electromagnetic field on the physical properties of spelt grain. *Scientific horizons*, 27(3), 64–72.

8. Nosov, G. V., Pustynnikov, S. V., & Kuleshova, E. O. (2020). Transformer generator of powerful current pulses. *Journal of applied mechanics and technical physics*, (61), 300–306.

9. Rudenko, A., & Kundenko, M. (2023). Analysis of microwave radiation generation technology with determination of adaptive diode type for further design of disinfection devices. *Integrated Technologies and Energy Saving*, (3), 24–37.

10. Storozhenko, I., & Arkusha, Yu. (2019). On increasing the power of short Gann diodes based on varizone InGaPAs. Bulletin of the V. N. Karazin Kharkiv National University, (31), 62–78.

11. Lyubutin, S. K., Rukin, S. N., Slovikovsky, B. G., & Tsyranov, S. N. T. (2012). Generation of powerful microwave voltage oscillations in a diffused silicon diode. *Semiconductors*, 47(5). https://doi.org/10.1134/S1063782613050151

12. Darznek, S., Lyubutin, S., & Rukin, S. (2012). Generation of microwave oscillations in a diode without a base. *Semiconductors*, (36), 599–604. https://doi.org/10.1134/1.1478555

УДК 681.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.6

С. В. ГАЙДУКЕВИЧ
старший викладач кафедри електротехнологій
та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів
і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0001-5910-5921

Н. П. СЕМЕНОВА
старший викладач кафедри електротехнологій
та експлуатації енергообладнання
Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів
і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-8478-9429

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТВАРИННИЦТВІ ТА ПТАХІВНИЦТВІ

В статті розглядаються особливості впровадження новітніх технологій та інноваційних рішень в галузі тваринництва та птахівництва для підвищення гнучкості і ефективності технологічних процесів та вирішення проблем стосовно енергоощадності.

Сучасні тенденції в галузях тваринництва і птахівництва призводять до удосконалення існуючих та реалізації нових технологічних процесів, які ґрунтуються на інноваційних технологіях, що докорінно змінює концепції сільськогосподарських виробництв та дають можливість створення «розумних» господарств.

У цьому контексті на реальному прикладі продемонстровано можливість реалізації Інтернет речей для удосконалення технологічних процесів свинарника-маточника. А також показано, що в умовах глобальних викликів завдяки сучасним інноваційним технологіям господарство з традиційними методами виробництва можна конвертувати у конкурентоспроможне, високотехнологічне, «розумне» господарство з інтелектуальними та автоматизованими системами. Розкрито тенденції та передбачення вдосконалення технологічних процесів за рахунок діджиталізації автоматизованої системи керування для надання можливості підключення усіх установок та агрегатів до глобальної мережі Інтернет, що послужило ключовим фактором створення ефективного «розумного» господарства.

Такі технології позволяють кардинально змінити підходи до удосконалення технологічних процесів у сільськогосподарському виробництві з метою вирішення проблем розвитку сучасних господарств, що використовують автоматизовані системи.

Доведено, що технологічні процеси усіх виробничих підрозділів галузей тваринництва та птахівництва необхідно активно удосконалювати впроваджуючи інноваційні технології та підвищуючи рівень цифрової трансформації, оскільки це дасть змогу зменшити затрати праці на одну голову або одиницю одержаної продукції, знизити енерговитрати, підвищити продуктивність і якість продукції тим самим збільшити економічну ефективність.

Ключові слова: *інформаційні технології, цифровізація, технологічні процеси, тваринництво, автоматизована система.*

S. V. HAIDUKEVYCH
Senior Lecturer at the Department of Electrical Technology
and Operation of Power Equipment
Separated Subdivision of the National University of Bioresources
and Nature Management of Ukraine “Berezhansky Agrotechnical Institute”
ORCID: 0000-0001-5910-5921

N. P. SEMENOVA
Senior Lecturer at the Department of Electrical Technology
and Operation of Power Equipment
Separated Subdivision of the National University of Bioresources
and Nature Management of Ukraine “Berezhansky Agrotechnical Institute”
ORCID: 0000-0002-8478-9429

MODERN TRENDS IN IMPROVING TECHNOLOGICAL PROCESSES IN LIVESTOCK AND POULTRY

The article examines the features of the introduction of the latest technologies and innovative solutions in the field of animal husbandry and poultry farming to increase the flexibility and efficiency of technological processes and solve problems related to energy saving.

Modern trends in the fields of animal husbandry and poultry farming lead to the improvement of existing and implementation of new technological processes based on innovative technologies, which fundamentally changes the concept of agricultural production and makes it possible to create «smart» farms.

In this context, a real-life example demonstrates the possibility of implementing the Internet of Things to improve the technological processes of a sow barn. It is also shown that in the context of global challenges, thanks to modern innovative technologies, a farm with traditional production methods can be converted into a competitive, high-tech, "smart" farm with intelligent and automated systems. The article reveals trends and foresight of technological processes improvement through digitalization of the automated control system to enable connection of all installations and units to the global Internet, which served as a key factor in creating an effective "smart" farm.

Such technologies make it possible to fundamentally change the approaches to the improvement of technological processes in agricultural production in order to solve the problems of the development of modern farms that use automated systems.

It has been proven that the technological processes of all production divisions of the livestock and poultry industries must be actively improved by introducing innovative technologies and increasing the level of digital transformation, as this will make it possible to reduce labor costs per head or unit of production, reduce energy costs, increase productivity and product quality, thereby increasing economic efficiency.

Key words: *information technology, digitalization, technological processes, animal husbandry, automated system.*

Постановка проблеми

З розвитком цифровізації в технологіях виник значний прогрес, автоматизація перейшла на вищу ступінь сучасного формату, що спричинило значні перетворення та зумовило до суттєвих змін в галузях тваринництва і птахівництва. Традиційні методи виробництва стають застарілими та малоефективними [1], що приводить до занепаду галузей і безпосередньо впливає на продовольчу безпеку країни. Сучасні ферми потребують нових технологій, які дають змогу оптимізувати і покращити системи утримання тварин і птиці, захищати навколишнє середовище, підвищити якість продукції [2, с. 16], удосконалити технологічні процеси з метою збільшення гнучкості та зниження витрат. Тобто сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій зумовили по-новому подивитися на традиційні підходи та породили виклики, які стали стимуляторами пошуку нових оптимальних шляхів розвитку сільськогосподарських виробництв.

В умовах глобалізованого середовища на передові позиції виходить розумне фермерство, також відоме як інтелектуальне сільське господарство, яке ґрунтується на впровадженні передових технологій [3]. Разом з цим для успішного впровадження цифрових змін та забезпечення економічного зростання підприємств галузей необхідним є розроблення стратегії [4, с. 38] тенденційного підходу удосконалення технологічних процесів, яка би визначала цілі і засоби досягнення їх інноваційного розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Багато вітчизняних та закордонних науковців працюють над питанням впровадження інноваційних технологій у сільськогосподарське виробництво. Наприклад, Левченко І. С., Головня О. М., Чемерис Ю. С. та ін. переконані, що інноваційні технології у сільському господарстві підвищать конкурентоспроможність продукції. Багмет В. С. досліджуючи інструменти індустрії 4.0 пропонує деякі шляхи впровадження новітніх технологій. Назаренко Н., Заєць С., Киричук Ю. стверджують, що Індустрію 4.0 та IoT можна використовувати у різних галузях, в результаті чого, компанії отримають конкурентні переваги, покращать свою екологічну та соціальну відповідальність і сприятимуть сталому розвитку [5, с. 78]. Бугріменко Р. М., Смірнова П. В. та ін. проявляючи зацікавленість до питання впливу цифрової трансформації на діяльність підприємств запевняють, що цифровізація є ключовою тенденціє створення нової бізнес-моделі, а також відіграє велику роль у прийняті управлінських рішень та оптимізації бізнес-процесів. Але нажаль в Україні рівень впровадження цифрових технологій в сільське господарство та його галузі поки залишається низьким [6, с. 182].

Незважаючи на великі досягнення науковців ще не повністю розкрито питання стосовно сучасних тенденцій удосконалення технологічних процесів в тваринницьких і птахівничих приміщеннях в умовах глобальних викликів.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є проведення аналізу сучасних тенденцій та інновацій в галузях тваринництва і птахівництва, визначення перспектив впровадження інноваційних технологій та методів удосконалення технологічних процесів на прикладі свинарника-маточника.

Викладення основного матеріалу дослідження

Тваринництво і птахівництво є основними галузями, які забезпечують ринок натуральними цінними продуктами харчування. Але на сьогоднішній день ці галузі перебувають у дуже скрутному становищі. Оскільки виробництво і переробка у період переходу на ринкові засади зіткнулися з великими труднощами, що спричинили високі темпи скорочення поголів'я худоби [7, с. 270] і птиці. Наразі продовжується певний спад виробництва, подальше зменшується поголів'я, знижується їхня продуктивність, втрачається генетичний фонд, зношуються й старіють основні фонди та технічна база [8, с. 138]. На рисунку 1 можна прослідкувати динаміку виробництва свинини на протязі 1980–2020 рр. Такий спад проходив у всіх напрямках галузей тваринництва і птахівництва. Ще дотепер даються взнаки негативні тенденції, оскільки занепад цих галузей безпосередньо впливає на економіку країни.

Аналіз стану галузей тваринництва і птахівництва свідчить про те, що в процесі прогресивного розвитку інноваційних технологій необхідно всі зусилля спрямувати на технічне переоснащення та удосконалення технологічних процесів з метою забезпечення стійкого розвитку цих галузей.

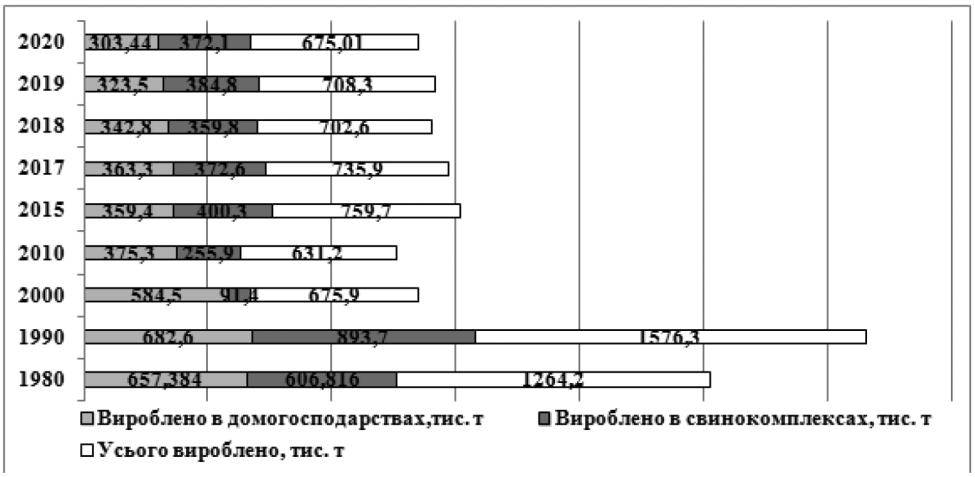


Рис. 1. Динаміка виробництва свинини в Україні за 1980–2020 роки [9, с. 65]

В останні роки достатньо чітко намітилася тенденція переходу від створення техніки для забезпечення існуючих технологій до створення нових технологічних рішень на базі принципово нових машин та обладнання [10, с. 249]. Оскільки перехід до цифрової трансформації, яка спрямована на підвищення ефективності виробництва продукції, організацію контролю витрат та виробничих процесів [11, с. 134], веде до створення автоматизації та оптимізації технологічних процесів нового формату, що ґрунтуються на концепціях інформаційних технологій та глобальній індустріальній мережі Інтернет речей.

Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій виявляються, як власне, технологічні зміни, а також, як ті зрушення [12, с. 45] в технологічних процесах, які вони викликають. Оскільки вони забезпечують потужний інструментарій для обробки, зберігання, передачі та аналізу великих обсягів інформації [13, с. 47], створюють інтелектуальні системи, тим самим демонструють бурхливий та невпинний прогрес у галузях тваринництва і птахівництва, що стало основним фактором генерування сучасної культури та економіки.

Інноваційні технології спроможні кардинально змінити концепції сільськогосподарського виробництва створюючи нові перспективи для вирішення складних проблем та подальшого розвитку, що вказує на конвергенцію в напрямку розумного господарства, де всі об'єкти пов'язані мережею. Тобто сучасне господарство представляє собою єдиний кібернетичний організм, який управляється за допомогою автоматизованих систем через інтерфейс комп'ютерних програм [10, с. 249].

Можна виділити декілька напрямів інноваційних технологій, таких як: Інтернет речей (IoT), штучний інтелект, машинне навчання, автоматизація та робототехніка, обчислення в хмарі, кібербезпека та ін., які безпосередньо впливають на всі сфери життєдіяльності та поєднання їх можливостей являється основним інструментом перетворення в статус розумного, що дає змогу створити новий рівень ефективності. Найбільш впливовими чинниками є ті, що здатні забезпечити кардинальні зрушення у відродженні галузі тваринництва [6, с. 181] та птахівничої галузі.

Інтернет речей є однією із складових інноваційних технологій, який найбільш використовується в аграрному секторі та охоплює відразу декілька явищ: 1) володіння об'ємною інформацією; 2) об'єднання об'єктів інтелектуальної системи в єдину мережу з виходом в Інтернет; 3) вдосконалення процесів та систем керування, надаючи їм нових можливостей; 4) взаємодія всіх пристроїв інтелектуальної системи. Основна перевага Інтернету речей (IoT) – здатність дистанційно одночасно управляти багатьма процесами без участі людини.

Вирішення стратегічних завдань впливу передових технологій на рівень ефективності виробництва та вивчення сучасних тенденцій удосконалення технологічних процесів проведено на конкретному прикладі тваринницького приміщення свинарника-маточника на 100 голів розмірами 15 × 90 × 3 м (рис. 2), об'ємом 4050 м^3.

В свинарнику-маточнику, як правило, передбачено наступні технологічні процеси: загальне опалення, місцевий верхній і нижній обігрів поросят, вентиляція, освітлення, роздача кормів, прибирання гною та водонапування (рис. 3). Всі ці процеси виконуються традиційним методом і керуються за допомого релейно-контактних схем. Основним недоліком традиційного методу є ручне коригування контролюючих величин, що призводить до створення помилок та відповідно нестабільності параметрів, а це безпосередньо негативно впливає на точність виконання технологічного процесу та збільшення витрат на виробництво.

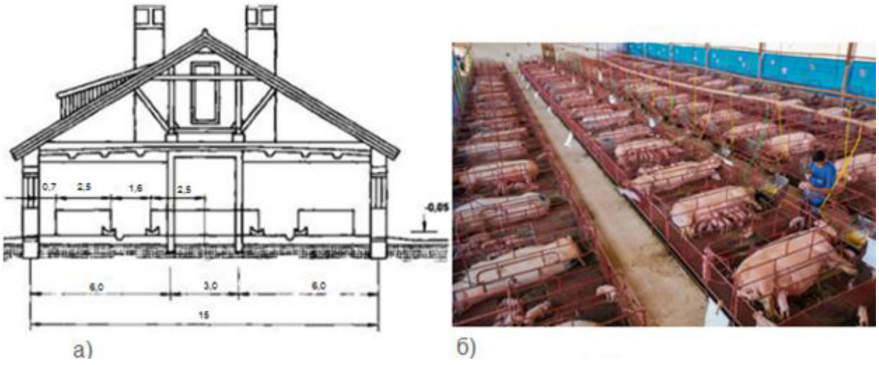


Рис. 2. Свинарник-маточник на 100 голів: *а* – розріз свинарника-маточника; *б* – загальний вигляд приміщення

Процеси свинарника-маточника енерговитратні, особливо найбільш витрачається енергії на загальне опалення, місцевий обігрів поросят та кондиціонування повітря в літній період, тобто створення оптимального мікроклімату. Зменшити енерговитрати, підвищити ефективність виробництва та рівень конкурентоспроможності можна різними відомими методами, але сучасні сільськогосподарські виробництва вимагають нових підходів, що базуються на впровадженні передових технологій та новаторських рішень, які здатні легко інтегруватися з існуючими системами в результаті сумісної та продуктивної роботи. Оскільки багато господарств, які намагаються впровадити інноваційні агротехнології у своє виробництво стикаються з проблемами недостатньої кількості коштів на придбання новітньої техніки. Не всі господарства готові свої вкладення витрачати на інноваційні дослідження та наукові розробки. Та переважно у багатьох господарствах фінансова сторона та нестача кваліфікаційних спеціалістів гальмує впровадження новітніх технологій.

Враховуючи стратегічні та технічні аспекти господарств та їх позитивні і негативні тенденції розроблено автоматичну систему, яка реалізуючи цифрові технології надає можливість перетворити традиційне виробництво у більш досконале за рахунок оптимізації технологічних процесів. Тобто, від традиційних методів обслуговування перехід до цифрових каналів, таких як мобільні додатки та соціальні мережі, дозволить підприємствам персоналізувати свої послуги та продукти [14].

З врахуванням нормативних параметрів даного тваринницького приміщення енергетичний баланс повітря визначено за формулою:

$$Q_{оп.} = Q_{ог} + Q_{в} + Q_{вип} + Q_{об} - Q_{т}, \quad (1)$$

де $Q_{оп}$ – кількість теплоти необхідної для опалення приміщення свинарника-маточника, ккал/год.; $Q_{ог}$ – втрати теплоти через зовнішні огорожі приміщення, ккал/год.; $Q_{в}$ – теплота, яка витрачається через вентиляцію, ккал/год.; $Q_{вип}$ – теплота, яка витрачається на випаровування, ккал/год.; $Q_{об}$ – втрати теплоти на обдуваємість, ккал/год.; $Q_{т}$ – вільна теплота, яка виділяється всіма тваринами, що є в приміщенні, кДж/год.

З попередніх розрахунків проведено динаміку втрат теплової енергії в залежності від зміни температури зовнішнього середовища (рис. 4). Оскільки характеристика загального балансу $Q_{оп}$ переходить в негативний діапазон координат після 6 °С то це свідчить про те, що при температурі нижче 6 °С для створення комфортних умов утримання свиней необхідно вводити додаткові теплові потужності, оскільки молодняк дуже чутливий до змін оточуючого середовища. Розрахунковий рівень вентиляції в залежності від маси тварини повинен становити близько 60–100 м^3/год на голову.

Розроблена автоматична система передбачає використання існуючих установок та агрегатів в якості виконавчих механізмів для виконання технологічних процесів у свинарнику-маточнику. Це в свою чергу збереже основні кошти господарств.

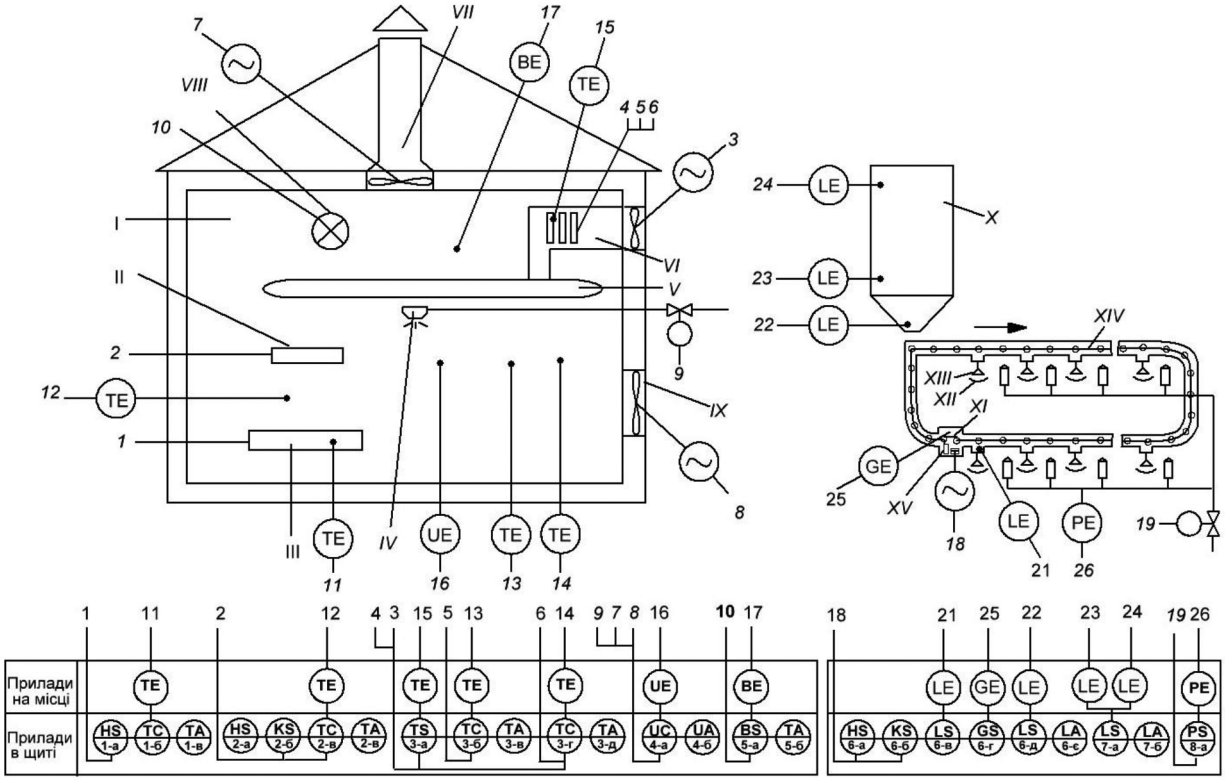


Рис. 3. Функціонально-технологічні схеми: а – створення оптимального мікроклімату; б – роздача кормів та напування; I – стійлове приміщення, II – інфрачервоні обігрівачі, III – обігрівна підлога, IV – пристрій для створення туману, V – повітропровід, VI – електрокалорифер з трьома секціями нагрівних елементів, VII – витяжна вентиляція, VIII – освітлювальний пристрій, IX – припливна вентиляція, X – бункер для корму, XI – натяжний пристрій, XII – годівниця, XIII – дозатор, XIV – тросошайбовий кормороздавач, XV – редуктор

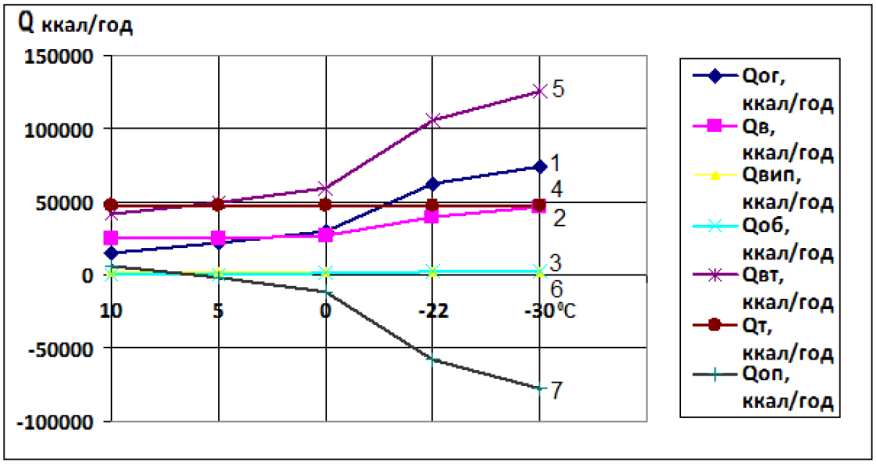


Рис. 4. Характеристики теплових втрат в залежності від температури зовнішнього середовища: 1 – втрати теплоти через огороджуючі конструкції, $Q_{ог}$ ккал/год.; 2 – втрати теплоти на вентиляцію, $Q_{в}$ ккал/год.; 3 – втрати теплоти на обдуваємість, $Q_{об}$ ккал/год.; 4 – тепловиділення від тварин, $Q_{т}$ ккал/год.; 5 – загальні витрати теплоти, $Q_{вт}$ ккал/год.; 6 – втрати теплоти на випаровування, $Q_{вип}$ ккал/год.; 7 – загальний тепловий баланс, $Q_{оп}$ ккал/год

Для підвищення гнучкості і ефективності технологічних процесів та алгоритму їх функціонування проведено діджиталізацію автоматизованої системи керування, що надає можливості підключення всіх об'єктів до глобальної мережі Інтернет з метою їх об'єднання в єдину велику централізовану мережу для збирання і обміну інформацією між ними, що дозволить повністю контролювати технологічні процеси в режимі реального часу,

вдосконалювати систему у відповідності до впливу збурюючих дій та приймати рішення в залежності від результатів аналізу тих чи інших змін.

Розроблена електротехнічна система реалізуючи концепції IoT технологій надає можливість дистанційно керувати всіма технологічними процесами свинарника-маточника та в режимі реального часу безперервно за допомогою різноманітних датчиків збирати інформацію, яка свідчить про стан керуючих величин.

Дана інформація реалізується за допомогою сучасних засобів (рис. 5), обробляється, зберігається та накопичується для подальшого використання, а трансформована інформація нової якості, тобто інформаційний продукт, передається для виконання тої чи іншої дії. Інформація є важливим і цінним джерелом для формування нових моделей керування. Ці принципово нові засоби і методи обробки даних об'єднуюся в цілісні технологічні системи і забезпечують практично всі функції [15, с. 273].



Рис. 5. Структура технології Інтернету речей [16, с. 121]

Обґрунтовуючи інноваційні стратегії тенденційного підходу удосконалення технологічних процесів можна розроблену автоматизовану систему розглядати як інформаційно-керуючу систему, яка набуває статусу «розумної».

Для формування системи вибрано інтелектуальні пристрої типу Sonoff, хоча на ринку на сьогоднішній день дуже великий вибір «розумних» електронних гаджетів різних відомих фірм, які обладнанні функціоналом, що дозволяє їм виконувати різні функції та підключатися до мережі Інтернет. Пристрої Sonoff чудово підходять для побудови бюджетних і функціональних рішень. Вони інтегруються через Wi-Fi або Zigbee і можуть керуватись через мобільний додаток eWeLink.

Дуже важливим завданням є вибір ефективного програмного продукту для забезпечення високотехнологічних об'єктів всіма необхідними технологічними функціями.

При розробці автоматичної системи керування «розумним будинком» було використано мобільний додаток eWeLink, а так, як не виконувалися деякі функції та не підтримувалися певні пристрої, а особливо, які розроблялися самостійно на мікропроцесорній платі NodeMCU, тому додатково було розгорнуто сервер та запущено платформу Home Assistant, яка підтримує пристрої різних виробників та виконує понад 2000 інтеграцій, забезпечує створення різноманітних сценаріїв автоматизації технологічних процесів з можливістю використання голосових помічників, а також формує панелі для моніторингу параметрів (температура, вологість, освітлення, напруга мережі, споживання енергії та ін.). Така добірка платформ, яка відмінно себе зарекомендувала в системі керування «розумним будинком», рекомендована для керування технологічними процесами в свинарнику-маточнику, оскільки безперечно задовольняє сучасні тенденції, властива до оновлення та розширення своїх можливостей, дозволяє використовувати магазин доповнень для встановлення додаткових плагінів та інструментів є вихід в Інтернет. Можна було б вибрати й інші платформи, але оскільки не було проведено відповідних досліджень то прийнято оптимальне рішення зупинитися на вище вказаній добірці платформ.

Температурні параметри та повітрообмін повинні бути ідеально підібрані, особливо для молодняку. Для створення оптимального мікроклімату вибрано блок керування AMC-PLUS (можна Venton), який використовується для підтримання в автоматичному режимі мікрокліматичних параметрів за заданим алгоритмом в залежності кривих температури, вологості, живої ваги по заданим дням і рівнем мінімальної вентиляції на кілограм живої ваги. В залежності від кількості голів контролер розраховує мінімальний рівень вентиляції по мірі того як жива вага збільшується. Тобто забезпечується повітрообмін в залежності від росту тварин.

Блок керування AMC-PLUS інтегрується в систему Home Assistant разом із розумними пристроями Sonoff, проте для цього потрібно забезпечити правильну взаємодію між їхніми протоколами. При їх об'єднанні у спільну систему Home Assistant використовується як «мозковий центр», що забезпечує перетворення сигналів та управління. Блок AMC-PLUS напряму підключається до Home Assistant, інтегруючись через Modbus (RTU/TCP), тобто IP-адресу для Modbus TCP або COM-порт для Modbus RTU. Якщо блок працює через аналоговий сигнал то використовується реле Sonoff 4CH PRO R3 для подачі на нього сигналів.

Система освітлення є невід'ємним фактором, що впливає на розвиток тварин, а також використовується для продовження дня та в якості чергового освітлення. В освітлювальній системі проведено заміну ламп розжарення на напівпровідникові економні смарт-лампами Sonoff Lamp, які можна монтувати у звичайні патрони. Ці лампи витрачають набагато менше електроенергії, а по-друге озброєні цифровою системою та програмним

забезпеченням, що надає можливість кожну лампу налаштовувати за індивідуальним сценарієм, але в даний момент, оскільки є чотири ряди світильників і чергове освітлення то всі лампи розбиті на п'ять груп і вмикаються за допомогою блоку керування AMC-PLUS. Якщо використати модуль розширення реле MR8 то можна виконувати й опромінення поросят.

Для локального прогріву поросят в зонах відпочинку використовуються інфрачервоні обігрівачі та система підлогового підігріву. Для керування обігрівною підлогою вибрано розумне Wi-Fi реле Sonoff Th320 20A, а інфрачервоними лампами Sonoff TH16 з датчиками температури DS18B20.

Особливо в літній період для охолодження повітря приміщення свинарника-маточника та підтримки вологості на рівні 60–70 % використано систему туманоутворення Idrotech Fog 60 Cabrio-50 (ZX.0570) з мінімальною витратою води. Оскільки підвищена температура знижує показники росту, погіршує їх апетит, негативно впливає на стан тварин, що може призвести до летальних випадків. Для керування системою туманоутворення використано реле Sonoff Dual R3 з підтримкою двох каналів (10 А кожний).

Для підтримання раціонального годування свиноматок і поросят та постійного водопостачання для їх напування використовується система автоматичного годування та водопостачання на базі чотирьохканального реле Sonoff 4CH PRO R3, яке може одночасно управляти декількома пристроями (годівницями, насосами).

Електродвигуни гноєприбиральних установок управляються 3-х фазними смарт автоматичними вимикачами типу HOCH ZJSB9-80Z за програмованим часом.

Можна для керування роботою деяких установок використати реле виготовлене на базі мікропроцесорної плати NodeMCU, оскільки воно багатофункціональне і може підключатися до резервної Wi-Fi у разі відсутності головної мережі.

Наприклад, інтеграція виконується наступним чином: при падінні температури в зоні відпочинку нижче нормованого значення реле TH16 вмикає інфрачервоні обігрівачі. При зниження температури підлоги реле Sonoff Th320 вмикає систему підігріву. Реле Dual R3 активує туманоутворювач при вологості нижче 60 %, реле 4CH PRO R3 активує у визначений час годування тварин при наявності корму в бункері.

Розроблена автоматична система окрім того, що збирає інформацію та контролює стан об'єктів і керуючих величин, слідкує за роботою виконавчих механізмів відповідно прописаного алгоритму та моніторить на екран персонального комп'ютера, або на якийсь інший пристрій історію любого контролюючого показника (рис. 6).

Впровадження в розробку технологічних інновацій розширює функції для оптимізації процесів, кардинально змінює спосіб їх керування та виконує комплекс рішень, які підвищують гнучкість і ефективність технологічних процесів та вирішують проблеми стосовно енергоощадності, а також надається можливість вивести на монітор всі показники контрольованих параметрів. Оскільки для будь якого господарства ключовим і немаловажливим аспектом є створення системи моніторингу та оцінки результатів впровадження інновацій, що дозволить вчасно виявляти проблеми та коригувати стратегію впровадження [17, с. 815].



Рис. 6. Контроль та регулювання контролюючих величин

Висновки дослідження та перспективи подальших розвідок

В умовах глобальних викликів завдяки сучасним інноваційним технологіям можна сформувати виробництво з інтелектуальними, автоматизованими системами, які контролюють та оптимізують використання ресурсів, зменшують витрати, збільшують ефективність виробництва, підвищують якість продукції та відповідно збільшують економічну безпеку на відміну господарствам з традиційними методами виробництва.

Розроблена автоматична система відіграє ключову роль у реалізації стратегій тенденційного підходу удосконалення технологічних процесів не тільки свинарника-відгодівельника, а всієї галузі тваринництва та галузі птахівництва. Оскільки ця система розширює можливості керування процесами, що підсилює ефективність роботи господарства.

В подальшому розроблену автоматичну систему можна удосконалювати, модернізувати, оскільки інноваційні технології постійно формуються, змінюються розвиваються, нові версії стають більш мережеві та володіють більшою потужністю та гнучкістю, а також регулярно потрібно оновлювати та підтримувати її програмне забезпечення.

Список використаної літератури

1, Багмет В.С. Інструментарій впровадження технологій індустрії 4.0 вітчизняними підприємствами. Економіка та суспільство. 2022. Вип. 40. Режим доступу: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2312/2234

2. Веселов Є.В., Щербакова, І.Л., Левченко І.С. Інноваційні технології у тваринництві та ефективність впровадження концепції Smart Farm. Таврійський науковий вісник. 2019. № 109. Ч. 2. С. 15–20.

3. Головня О.М., Чемерис Ю.С. Сучасні тренди інноваційності ринку сільськогосподарської техніки в умовах глобального середовища. Економіка та суспільство. 2024. Вип. 66. Режим доступу: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/4545/4488

4. Корінь М.В., Лановий О.А., Поддубкін М.М., Зайцева Л.Д. Розроблення стратегії цифрової трансформації підприємств залізничного транспорту. Вісник економіки транспорту і промисловості. 2022. № 78–79. С. 36–46.

5. Назаренко Н.М., Заєць С.С., Киричук Ю.В. Співпраця Індустрії 4.0 та Інтернету речей IoT. Вісник Хмельницького національного університету. 2024. № 5(341). С. 74–79.

6. Синявіна Ю.В., Бутенко Т.А. Перспективи розвитку галузі тваринництва в умовах цифровізації. Економічний аналіз. 2021. Т. 31. № 1. С. 178–185.

7. Пуцентейло П.П. Аналіз сучасного розвитку галузі тваринництва України. Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту. Київ : ДЕТУТ, 2015. Вип. 31. С. 268–276.

8. Смоляр В. Технічне забезпечення сучасних тваринницьких ферм. Техніко-технологічні аспекти розвитку та випробування нової техніки і технологій для сільського господарства України: збірник наук. пр. / ДНУ «Український науково-дослідний інститут прогнозування та випробування техніки і технологій для сільськогосподарського виробництва імені Леоніда Погорілого». Дослідницьке : УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого, 2021. Вип. 28(42). С. 138–149.

9. Михалко О.Г. Сучасний стан та шляхи розвитку свинарства в світі та Україні. Вісник Сумського національного аграрного університету. 2021. Вип. 3(46). С. 61–77.

10. Палій А.П. Тенденції сучасного тваринництва. Інноваційні розробки в аграрній сфері: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції (28–29 листопада 2018 року). Харків : ХНТУСГ, 2018. С. 249.

11. Канівець Х.О., Коробченко А.О., Проценко С.В., Работинський А.М, Левченко М.В. Тенденції розвитку галузі тваринництва в умовах цифрової трансформації. Таврійський науковий вісник. 2021. № 121. С. 133–139.

12. Консул Т.С, Крикунова В.М. Виклики та можливості в умовах сучасного етапу розвитку інформаційних технологій. Сучасна молодь в світі інформаційних технологій: матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та здобувачів вищої освіти присвяченої Дню науки (17 травня 2024 р.). Херсон-Кропивницький, 2024. С. 45–46.

13. Кришун В.О., Лижник Ю.Б. Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій у світі. Сучасна молодь в світі інформаційних технологій: матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених та здобувачів вищої освіти присвяченої Дню науки (17 травня 2024 р.). Херсон-Кропивницький, 2024. С. 47–48.

14. Бугріменко Р.М., Смірнова П.В. Вплив розвитку цифрової трансформації на діяльність підприємства. Економіка та суспільство. 2024. Вип. 59. Режим доступу: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3386/3313

15. Бойко Н. Умови, стратегії та перспективи розвитку інформаційних технологій. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». 2012. № 744. С. 271–277. Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/feb/33802/vis744komp-nauky-271-277.pdf

16. Щербаков О.В. Інтернет речей: перспективи застосування дома та на підприємстві. Комп'ютерно-інтегровані технології автоматизації технологічних процесів на транспорті та у виробництві: матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених (23 листопада 2022 р.). Харків : ХНАДУ, 2022. С. 120–124.

17. Троян В.І., Швед А.Б., Браташ М.А. Механізм управління впровадженням технологічних інновацій у сфері надрокористування. Наукові перспективи, 2024. № 4(46). С. 808–817.

References

1. Bahmet V.S. (2022) Instrumentarii vprovadzhennia tekhnolohii industrii 4.0 vitchyznianymy pidpryiemstvamy [Toolkit for the implementation of Industry 4.0 technologies by domestic enterprises]. Ekonomika ta suspilstvo. vol. 40. Available at: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/2312/2234. [in Ukrainian].

2. Veselov Ye. V., Shcherbakova, I. L., Levchenko I. S. (2019) Innovatsiini tekhnolohii u tvarynnytstvi ta efektyvnist vprovadzhennia kontseptsii Smart Farm [Innovative livestock technologies and the effectiveness of smart farm implementation]. Tavriiskyi naukovyi visnyk. no. 109(2). pp. 15–20. [in Ukrainian].

3. Holovnia O. M., Chemerys Yu. S. (2024) Suchasni trendy innovatsiinosti rynku silskohospodarskoi tekhniky v umovakh hlobalnoho seredovyshcha [Current innovative trends of the agricultural equipment market in the global environment]. Ekonomika ta suspilstvo. vol. 66. Available at: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/4545/4488. [in Ukrainian].

4. Korin M. V., Lanovyi O. A., Poddubkin M. M., Zaitseva L. D. (2022) Rozroblennia stratehii tsyfrovoi transformatsii pidpryiemstv zaliznychnoho transportu [Development of the digital transformation strategy of railway transport enterprises]. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti. no. 78–79. pp. 36–46. [in Ukrainian].

5. Nazarenko N. M., Zaiets S. S., Kyrychuk Yu. V. (2024) Spivpratsia industrii 4.0 ta internetu rechei IoT [Cooperation of Industry 4.0 and the Internet of things IoT]. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. no. 5(341). C. 74–79. [in Ukrainian].

6. Syniavina Yu. V., Butenko T. A. (2021) Perspektyvy rozvytku haluzi tvarynnytstva v umovakh tsyfrovizatsii [Prospects for the development of the livestock industry in terms of digitalization]. Ekonomichnyi analiz. T. 31. no. 1. pp. 178–185. [in Ukrainian].

7. Putsenteilo P. P. (2015) Analiz suchasnoho rozvytku haluzi tvarynnytstva Ukrainy [Analysis of the modern development of the livestock industry of Ukraine.]. Zbirnyk naukovykh prats Derzhavnoho ekonomiko-tekhnolohichnoho universytetu transportu. Kyiv : DETUT. vol. 31. pp. 268-276. [in Ukrainian].

8. Smoliar V. (2021) Tekhnichne zabezpechennia suchasnykh tvarynnytskykh ferm [Technical support of modern livestock farms]. Tekhniko-tekhnolohichni aspekty rozvytku ta vyprobuvannia novoi tekhniky i tekhnolohii dlia silskoho hospodarstva Ukrainy: zbirnyk nauk. pr. / DNU "Ukrainskyi naukovo-doslidnyi instytut prohnozuvannia ta vyprobuvannia tekhniky i tekhnolohii dlia silskohospodarskoho vyrobnytstva imeni Leonida Pohoriloho". Doslidnytske: UkrNDIPVT im. L. Pohoriloho. vol. 28(42). pp. 138–149. [in Ukrainian].

9. Mykhalko O. H. (2021) Suchasnyi stan ta shliakhy rozvytku svynarstva v sviti ta Ukraini [Current state and ways of pig production in the world and Ukraine]. Visnyk Sumskoho natsionalnoho ahrarnoho universytetu. vol. 3(46). pp. 61–77. [in Ukrainian].

10. Palii A. P. (2018) Tendentsii suchasnoho tvarynnytstva [Trends in modern animal husbandry]. Innovatsiini rozrobky v ahrarnii sferi: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii (28–29 lystopada 2018 roku). Kharkiv: KhNTUSH. pp. 249. [in Ukrainian].

11. Kanivets Kh. O., Korobchenko A. O., Protsenko S. V., Rabotynskyi A. M, Levchenko M. V. (2021) Tendentsii rozvytku haluzi tvarynnytstva v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Trends in the development of the livestock industry in the conditions of digital transformation]. Tavriiskyi naukovyi visnyk. no. 121. pp. 133–139. [in Ukrainian].

12. Konsul T. S, Krykunova V. M. (2024) Vyklyky ta mozhlyvosti v umovakh suchasnoho etapu rozvytku informatsiinykh tekhnolohii [Challenges and opportunities in the conditions of the modern stage of information technology development.]. Suchasna molod v sviti informatsiinykh tekhnolohii: materialy V Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh ta zdobuvachiv vyshchoi osvity prysviachenoi Dniu nauky (17 travnia 2024 r.). Kherson-Kropyvnytskyi. pp. 45–46. [in Ukrainian].

13. Kryshun V. O., Lyzhnyk Yu. B. (2024) Suchasni tendentsii rozvytku informatsiinykh tekhnolohii u sviti [Modern trends in the development of information technologies in the world]. Suchasna molod v sviti informatsiinykh tekhnolohii: materialy V Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii molodykh vchenykh ta zdobuvachiv vyshchoi osvity prysviachenoi Dniu nauky (17 travnia 2024 r.). Kherson-Kropyvnytskyi. pp. 47–48. [in Ukrainian].

14. Buhrimenko Buhrimenko R. M., Smirnova P. V. (2024) Vplyv rozvytku tsyfrovoi transformatsii na diialnist pidpryiemstva [Impact of the development of digital transformation on enterprise activities]. Ekonomika ta suspilstvo. vol. 59. [in Ukrainian]. Available at: https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/3386/3313

15. Boiko N. (2012) Umovy, stratehii ta perspektyvy rozvytku informatsiinykh tekhnolohii [Conditions, strategies and prospects for the development of information technologies]. Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". no. 744. pp. 271–277. Режим доступу: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2024/feb/33802/vis744komp-nauky-271-277.pdf. [in Ukrainian].

16. Shcherbakov O. V. (2022) Internet rechei: perspektyvy zastosuvannia doma ta na pidpryiemstvi [Internet of things: prospects of application at home and in the enterprise]. Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv na transporti ta u vyrobnytstvi: materialy Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh (23 lystopada 2022 r.). Kharkiv: KhNADU. pp. 120–124. [in Ukrainian].

17. Troian V. I., Shved A. B., Bratash M. A. (2024) Mekhanizm upravlinnia vprovadzhenniam tekhnolohichnykh innovatsii u sferi nadrokorystuvannia [Mechanism for managing the introduction of technological innovations in the field of subsoil use]. Naukovi perspektyvy. no. 4(46). pp. 808–817. [in Ukrainian].

УДК 274 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.7

О. В. ГОЛОВІНА
кандидат технічних наук, доцент,
завідувачка кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0000-0002-9858-888X

Ю. Ф. ХОЛОДНИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0009-6695-8258

О. П. СТРОКОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0008-2620-4454

В. О. ЖОВТОБРЮХ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій
Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук
ORCID: 0009-0007-2438-6082

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ ДІАГНОСТИКИ І РЕМОНТУ ЕЛЕКТРОННИХ СИСТЕМ НА ПОДАЛЬШУ ТЕХНІЧНУ ЕКСПЛУАТАЦІЮ АВТОМОБІЛЯ

Мета статті *– дослідити, як якість діагностики та ремонту електронних систем автомобіля впливає на його подальшу технічну експлуатацію, розглянути ключові фактори, що визначають ефективність цих процесів, та запропонувати рекомендації для забезпечення надійності транспортного засобу.*

Наукова новизна. *У статті обґрунтовано комплексний підхід до оцінки впливу якості діагностики й ремонту на технічну експлуатацію автомобіля, враховуючи сучасні технології (IoT, штучний інтелект, хмарні рішення) та специфіку електрифікованих транспортних засобів. Новизна полягає у систематизації наслідків неякісного обслуговування та акценті на економічних і екологічних аспектах.*

Результати. *Дослідження показало, що точна діагностика з використанням сучасного обладнання, такого як OBD-сканери, комп'ютерні системи та IoT-сенсори, дозволяє своєчасно виявляти несправності в електронних системах автомобіля, таких як ECU, ABS, ESP, а також батареї електромобілів, що значно скорочує час ремонту та запобігає пошкодженню суміжних компонентів. Наприклад, швидке визначення першопричини відмови одного елемента (наприклад, конденсаторів стабілізації напруги чи датчиків) може врятувати від перевантаження цілі модулі. Якісний ремонт із застосуванням оригінальних запчастин і кваліфікованим персоналом підвищує безпеку експлуатації – зокрема, справність систем безпеки (ABS, ESP, подушки безпеки) знижує ризик аварій, а також подовжує термін служби автомобіля за рахунок зменшення зносу ключових вузлів. Доведено, що використання сертифікованих аналогів замість дешевих підробок забезпечує сумісність і довговічність систем, тоді як неякісні компоненти призводять до повторних поломок уже через 3–6 місяців експлуатації. Економічний ефект якісного обслуговування проявляється у зниженні загальних витрат на ремонт (до 30 % за рік) та підвищенні залишкової вартості автомобіля на вторинному ринку (на 10–15 % за оцінками експертів). Натомість низька якість діагностики, наприклад, через застаріле обладнання чи недостатню кваліфікацію майстрів, спричиняє помилкові висновки, що веде до нестабільної роботи систем, зростання викидів* CO_2 *(до 20 % у разі несправностей двигуна) та скорочення терміну служби автомобіля на 25–30 %. Застосування передових технологій, таких як штучний інтелект і предиктивна аналітика, дозволяє прогнозувати поломки з точністю до 85 %, що підтверджується дослідженнями, сприяючи профілактичному підходу та зниженню аварійності.*

Висновки. *Якість діагностики та ремонту є критично важливим фактором для забезпечення надійної й безпечної експлуатації автомобіля. Інвестування в професійне обладнання, навчання персоналу та регулярну профілактику дозволяє мінімізувати ризики поломок і оптимізувати технічний стан транспортного засобу в довгостроковій перспективі.*

Ключові слова: *технічна експлуатація, діагностика автомобіля, електронні системи автомобіля, ремонт електронного обладнання, надійність автомобіля.*

O. V. HOLOVINA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Automobile Transport and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk
ORCID: 0000-0002-9858-888X

YU. F. KHOLODNYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University in Kremenchuk
ORCID: 0009-0009-6695-8258

O. P. STROKOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University Kremenchuk
ORCID: 0009-0008-2620-4454

V. O. ZHOVTOBRYUKH
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Motor Transport and Transport Technologies
Branch of the Classical Private University Kremenchuk
ORCID: 0009-0007-2438-6082

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF THE QUALITY OF DIAGNOSTICS AND REPAIR OF ELECTRONIC SYSTEMS ON THE FURTHER TECHNICAL OPERATION OF THE CAR

The purpose of the article is to investigate how the quality of diagnostics and repair of vehicle electronic systems affects its further technical operation, to consider the key factors that determine the efficiency of these processes, and to propose recommendations for ensuring vehicle reliability.

Scientific novelty. The article substantiates an integrated approach to assessing the impact of the quality of diagnostics and repairs on the technical operation of a vehicle, considering modern technologies (IoT, artificial intelligence, cloud solutions) and the specifics of electrified vehicles. The novelty lies in the systematization of the consequences of poor-quality service and the emphasis on economic and environmental aspects.

Results. The study showed that accurate diagnostics using modern equipment, such as OBD scanners, computer systems, and IoT sensors, allows timely detection of malfunctions in-vehicle electronic systems such as ECU, ABS, ESP, and electric vehicle batteries, which significantly reduces repair time and prevents damage to adjacent components. For example, quickly identifying the root cause of a single component failure (such as voltage stabilization capacitors or sensors) can save entire modules from overloading. High-quality repairs using original spare parts and qualified personnel increase operational safety – in particular, the serviceability of safety systems (ABS, ESP, airbags) reduces the risk of accidents and extends the vehicle's life by reducing wear and tear on key components. It has been proven that using certified analogs instead of cheap counterfeits ensures the compatibility and durability of the systems, while low-quality components lead to repeated breakdowns after 3–6 months of operation. The economic effect of high-quality service is manifested in a reduction in total repair costs (up to 30 % per year) and an increase in the residual value of the car on the secondary market (by 10–15 %, according to experts). Instead, poor diagnostic quality, for example, due to outdated equipment or insufficient qualifications of technicians, leads to erroneous conclusions, which results in unstable systems, increased CO_2 *emissions (up to 20 % in the case of engine malfunctions), and a 25–30 % reduction in vehicle life. The use of advanced technologies, such as artificial intelligence and predictive analytics, can predict breakdowns with an accuracy of up to 85 %, which is confirmed by research, contributing to a preventive approach, and reducing accidents.*

Conclusions. The quality of diagnostics and repair is a critical factor in ensuring reliable and safe vehicle operation. Investing in professional equipment, staff training, and regular preventive maintenance can minimize the risk of breakdowns and optimize the technical condition of the vehicle in the long term.

Key words: *technical operation, car diagnostics, car electronic systems, repair of electronic equipment, car reliability.*

Постановка проблеми

Сучасні автомобілі дедалі більше оснащуються сучасними електронними системами високого рівня, зокрема, блоками управління двигуном (ECU), CAN-мережами і системами датчиків, що забезпечують точне управління двигуном, безпеку поїздки для мандрівників (ETT, наприклад, за допомогою системи запобігання розриву подушок безпеки або адаптивної системи контролю швидкості) і комфорт для мандрівників. При цьому якість діагностики та ремонту цих систем є запорукою їх надійності, безпеки та довговічності, оскільки неякісна діагностика,

некваліфіковане втручання, що неправильно вирішує проблему, може зробити систему нестабільною, спричинити збільшення викидів шкідливих речовин (наприклад, CO_2 та NOx), підвищений знос компонентів, ризик аварій, як показують дослідження в автомобільній галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Rübartsch M., Gerten M., Frei S. [1] досліджують онлайн-діагностику конденсаторів стабілізації напруги в автомобільних електронних системах, що дозволяє своєчасно виявляти несправності, підвищуючи надійність і безпеку подальшої експлуатації автомобіля. Zhang Y., Salehi R., Zhou S., Jia X., Siegel J. [2] зосереджуються на передових методах діагностики та прогнозування стану автомобільних систем, підкреслюючи, як якісна діагностика впливає на довговічність і ефективність технічної експлуатації. Ayachit V.V., Gandhi N., Kakade S. [3] розробили уніфікований інструмент для тестування діагностики за межами автомобіля, що сприяє точному виявленню проблем електронних систем, зменшуючи ризик збоїв під час подальшої експлуатації. М.В. Красота, Ю.В. Кулєшков, І.В. Шепеленко, Р.А. Осін, Т.В. Руденко [4] аналізують шляхи підвищення оперативності діагностики електронних систем автотракторної техніки, показуючи, як швидке і якісне виявлення несправностей покращує технічний стан і тривалість експлуатації. Bernardi P., Filipponi G., Sonza Reorda M., Appello D., Bertani C., Tancorre V. [5] досліджують методи збору діагностичної інформації для автомобільних систем на кристалі з затримками, що допомагає оптимізувати ремонт і підтримувати стабільну експлуатацію. Santhosh Kumar P.V., Keshava Murthy G.N. [6] пропонують автомобільний тестувальник сенсорів на базі Raspberry Pi, який полегшує інженерам діагностику, сприяючи якісному ремонту і надійності електронних систем у подальшій роботі. M. Kathiresh, R. Neelaveni, M. Adwin Benny, B. Jeffrin Samuel Moses [7] розглядають діагностику через інтернет-протокол та оновлення «по повітрю», що забезпечує точне виявлення проблем і підтримку електронних систем для стабільної експлуатації автомобіля. Kathiresh M., Neelaveni R., Adwin Benny M., Jeffrin Samuel Moses B. [8] розробили віртуальний блок керування для тестування діагностичного програмного забезпечення за протоколом UDS, що покращує якість діагностики і впливає на ефективність ремонту та експлуатації. Cheng Y., Porpora F., D'Arpino M., Rizzoni G. [9] аналізують витрати на захист, моніторинг і діагностику батарейних систем, демонструючи, як якісна діагностика знижує витрати на ремонт і підвищує термін служби автомобіля. Sonar K.A., Chopade N.B., Rajani P.K. [10] інтегрують хмарні технології з гальмівним ECU та ESP, показуючи, як точна діагностика електронних систем гальмування покращує безпеку і технічну експлуатацію автомобіля.

Дослідження демонструють різноманітність підходів до діагностики, які, попри відмінності у методах і фокусі, мають спільну мету – підвищення надійності та ефективності експлуатації автомобільних систем. Наприклад, Rübartsch M. та ін. [1] зосереджуються на онлайн-діагностиці конденсаторів стабілізації напруги, тоді як Zhang Y. та ін. [2] ширше розглядають прогнозування стану систем, що дозволяє порівняти локальну оптимізацію окремих компонентів із системним підходом до довговічності. Подібно до цього, уніфікований тестувальник Ayachit V.V. та ін. [3] і тестувальник сенсорів на базі Raspberry Pi від Santhosh Kumar P.V. та ін. [6] спрямовані на точність діагностики, але перший акцентує на зовнішньому тестуванні, а другий – на доступності для інженерів, що підкреслює комплементарність цих інструментів.

Порівняння розробок Kathiresh M. та ін. [7, 8] із працею Sonar K.A. та ін. [10] виявляє цікавий контраст оскільки діагностика через інтернет-протокол та хмарні технології орієнтовані на інтеграцію з сучасними цифровими рішеннями, тоді як Красота М.В. та ін. [4] і Bernardi P. та ін. [5] надають перевагу оперативності й оптимізації традиційних методів збору даних. Це співставлення показує, як нові технології доповнюють класичні підходи, створюючи багатогранну систему діагностики. Водночас Cheng Y. та ін. [9] додають економічний вимір, демонструючи, що якісна діагностика батарейних систем знижує витрати, на відміну від інших досліджень, де акцент більше на технічній стабільності чи безпеці, як у [10] з гальмівними ECU.

Таким чином, зіставлення результатів вказує на те, що сучасна діагностика автомобільних систем еволюціонує від локального вирішення проблем (як у [1, 3]) до комплексних, технологічно просунутих рішень ([7, 8, 10]), зберігаючи при цьому баланс між оперативністю, точністю та економічною доцільністю. Ці підходи взаємно підсилюють один одного, формуючи цілісну стратегію підвищення безпеки, надійності та ефективності експлуатації автомобілів.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є розгляд впливу якості діагностики і ремонту на подальшу технічну експлуатацію автомобіля, а також аналіз основних аспектів, які необхідно враховувати для досягнення оптимальних результатів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Діагностика електронних систем автомобілів становить первинний і визначальний етап виявлення несправностей, від точності якого залежить коректність подальшого ремонту [1–4]. Сучасні транспортні засоби обладнані бортовими комп'ютерами (ECU), що реєструють діагностичні коди помилок (DTC) і телеметричні дані про функціональний стан систем. Застосування професійного діагностичного обладнання забезпечує по-перше, прецизійну ідентифікацію першопричини несправності оскільки враховує системну взаємозалежність компонентів, де відмова одного елемента може дестабілізувати суміжні модулі [5]. По-друге, йдеться про скорочення часу

ремонту шляхом оперативного й точного локалізування дефектів, що мінімізує непродуктивні витрати. По-третє, це профілактика вторинних пошкоджень, що запобігає перевантаженню чи деградації інших складових завдяки ранньому виявленню аномалій [6]. Низька якість діагностики, зумовлена використанням застарілих інструментів або недостатньою кваліфікацією фахівців, призводить до хибних висновків, що компрометують довготривалу експлуатацію автомобіля. Наступний етап – ремонт – є не менш критичним і залежить від таких факторів, як використання оригінальних або сертифікованих аналогів деталей для гарантії сумісності й довговічності, а також високий рівень компетентності персоналу, адже некваліфіковане втручання може спричинити порушення електропроводки, неправильну інтеграцію компонентів або повний вихід модулів із ладу. На рисунку 1 можна побачити примітивне вирішення проблеми у автомобілях:

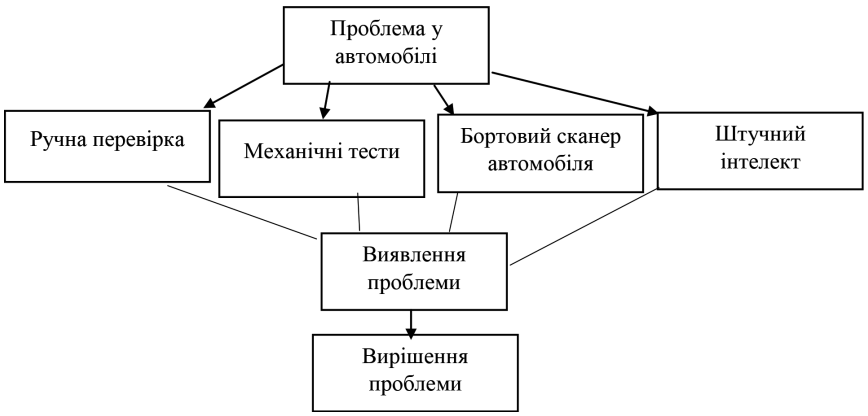


Рис. 1. Вирішення проблеми у автомобілях

Джерело: авторська розробка

Технічна специфікація кожного автомобіля вимагає дотримання рекомендацій виробника під час ремонту, адже відхилення від технологічних стандартів можуть дестабілізувати функціонування систем [7]. Низька якість діагностики та ремонту, зумовлена застарілим обладнанням або недостатньою кваліфікацією фахівців, призводить до помилкової інтерпретації даних і має суттєві наслідки для експлуатації. Несправності критичних систем, таких як ABS, ESP чи подушки безпеки, не лише знижують безпеку, підвищуючи ризик аварій, а й призводять до низки взаємопов'язаних проблем. Неякісне втручання при ремонті таких систем часто спричиняє повторні поломки, що, своєю чергою, збільшує фінансові витрати для власників автомобілів. Крім того, системні перевантаження, спричинені цими несправностями, прискорюють знос ключових компонентів, скорочуючи термін служби автомобіля на 25–30 %, як зазначають Kathiresh M. та ін. [8]. Економія палива напряму пов'язана з екологією: менша витрата означає зменшення викидів не лише CO_2 (до 20 %), а й оксидів азоту (NO_x), де несправний дизель стає лідером серед двигунів внутрішнього згоряння, та чадного газу (CO), що значно погіршує стан довкілля. Таким чином, якісна діагностика та ремонт стають критично важливими для забезпечення безпеки, зниження фінансових і ресурсних витрат та мінімізації екологічної шкоди, формуючи комплексний підхід до експлуатації автотранспорту. Використання сертифікованих аналогів або оригінальних запчастин замість низькоякісних підробок



Рис. 2. Діаграма якості діагностики та ремонту

Джерело: авторська розробка

забезпечує сумісність і довговічність систем, тоді як дешеві компоненти втрачають функціональність уже через 3–6 місяців, провокуючи повторні дефекти. Якісне обслуговування з професійним обладнанням не лише зменшує частоту поломок і знижує річні витрати на ремонт до 30 %, а й підвищує залишкову вартість автомобіля на вторинному ринку на 10–15 %, як свідчать експертні оцінки [8–9], що підкреслює економічну та технічну доцільність такого підходу, що проілюстровано на діаграмі нижче:

Сучасні досягнення в галузі автомобільних технологій, зокрема застосування штучного інтелекту та предиктивної аналітики, забезпечують прогнозування потенційних несправностей із точністю до 85 %, як підтверджують емпіричні дослідження [7–10], що сприяє впровадженню профілактичного підходу до технічного обслуговування та зниженню аварійності. Перспективні тенденції вказують на розвиток систем самодіагностики, зростання частки електромобілів і поглиблену інтеграцію з хмарними сервісами для зберігання й аналізу телеметричних даних. Для оптимізації діагностики та ремонту електронних систем рекомендується або користуватися послугами сертифікованих структур, які мають сучасні діагностичні прилади та штат кваліфікованого персоналу, або у разі тимчасового виходу з ладу використовувати оригінальні комплектуючі чи сертифіковані аналоги; керуватися сумісністю та довгостроковою надійністю систем; регулярно проводити профілактичну діагностику для своєчасного виявлення аномалій та запобігання критичним пошкодженням (оновлення систем та компетенції спеціалістів, які володіють власними системами, мають уявлення про сучасну модернізовану версію).

Висновки

Якісна діагностика та оперативний ремонт електронної системи безпосередньо впливає на подальшу технічну експлуатацію автомобіля. Точна діагностика дозволяє клінічно ідентифікувати проблеми, в той час як якісний ремонт зводить до мінімуму причину контролю і ризик. З іншого боку, низькоякісний план може призвести до більш серйозних наслідків, таких як зниження безпеки, збільшення витрат і скорочення терміну служби автомобіля. Щоб гарантувати надійність транспортного засобу, його технічне обслуговування слід доручати фахівцям і використовувати високоякісні матеріали та обладнання. Таким чином, інвестиція в точну діагностику і довговічний ремонт – це відповідь на довгу і безпечну експлуатацію автомобіля.

Список використаної літератури

1. Rübartsch M., Gerten M., Frei S. On-Line Diagnosis of Supply Voltage Stabilizing Capacitors in Automotive Electronic Systems. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10403181

2. Zhang Y., Salehi R., Zhou S., Jia X., Siegel J. Special issue on advanced diagnostics and prognostics for automotive systems. International Journal of Prognostics and Health Management. 2023 Vol. 14 Is. 3. DOI: https://doi.org/10.36001/ijphm.2023.v14i3.3438. URL: https://papers.phmsociety.org/index.php/ijphm/article/view/3438

3. Ayachit V.V., Gandhi N., Kakade S. Unified Diagnostics Off-board Tool Development Testing. SAE Technical Paper 2024-01-5041, 2024, 1–22. DOI: https://doi.org/10.4271/2024-01-5041. URL: https://saemobilus.sae.org/papers/unified-diagnostics-off-board-tool-development-testing-2024-01-5041.

4. Красота М.В., Кулєшков Ю.В., Шепеленко І.В., Осін Р.А., Руденко Т.В.. Дослідження шляхів підвищення оперативності виконання діагностичних операцій електронних систем автотракторної техніки. Центральноукраїнський науковий вісник. 2024. № 9. 40. С. 1-8. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.144-151. URL: https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/9(40)_I/18.pdf

5. Bernardi P., Filipponi G., Sonza Reorda M., Appello D., Bertani C., Tancorre V. Collecting diagnostic information through dichotomic search from Logic BIST of failing in-field automotive SoCs with delay faults. 26th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS). 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/DDECS57882.2023.10139670. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10139670/keywords#keywords

6. Santhosh Kumar P.V., Keshava Murthy G.N. Notice of Removal: Implementation of Automotive Sensor Tester for Engineers at OEMs and Vehicle Service Agencies using Raspberry Pi. IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT). 2022. DOI: https://doi.org/10.1109/GCAT55367.2022.9972090. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9972090/authors#authors

7. M. Kathiresh, R. Neelaveni, M. Adwin Benny & B. Jeffrin Samuel Moses. Vehicle Diagnostics Over Internet Protocol and Over-the-Air Updates. Book series EAI/Springer Innovations in Communication and Computing. 2021. Chapter.

8. First Online: 25 April 2021. Pp. 89-100. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59897-6_5. URL: https://www.springerprofessional.de/en/vehicle-diagnostics-over-internet-protocol-and-over-the-air-upda/19102096

9. Kathiresh M., Neelaveni R., Adwin Benny M., Jeffrin Samuel Moses B. Virtual ECU Development for Vehicle Diagnostics Software Testing using UDS Protocol. Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON). 2021. DOI: 10.1109/ASIANCON51346.2021.9544542. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9544542

10. Cheng Y., Porpora F., D'Arpino M., Rizzoni G. Cost analysis in different battery pack architectures considering protection, monitoring, and diagnostics. IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC). 2021. DOI: https://doi.org/10.1109/ITEC51675.2021.9490170. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/9490170

11. Sonar K.A., Chopade N.B., Rajani P.K. Cloud-Integrated Braking ECU with ESP Technology. 8th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA). 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCUBEA61740.2024.10774736. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10774736

References

1. Rübartsch, M., Gerten, M., & Frei, S. (2023). On-line diagnosis of supply voltage stabilizing capacitors in automotive electronic systems. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*. DOI: https://doi.org/10.1109/VPPC60535.2023. Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/10403181 [in English].

2. Zhang, Y., Salehi, R., Zhou, S., Jia, X., & Siegel, J. (2023). Special issue on advanced diagnostics and prognostics for automotive systems. *International Journal of Prognostics and Health Management, 14*(3). DOI: https://doi.org/10.36001/ijphm.2023.v14i3.3438. Retrieved from https://papers.phmsociety.org/index.php/ijphm/article/view/3438 [in English].

3. Ayachit, V.V., Gandhi, N., & Kakade, S. (2024). Unified diagnostics off-board tool development testing (SAE Technical Paper 2024-01-5041). *SAE Technical Papers*. DOI: https://doi.org/10.4271/2024-01-5041. Retrieved from https://saemobilus.sae.org/papers/unified-diagnostics-off-board-tool-development-testing-2024-01-5041 [in English].

4. Krasota M.V., Kulieshkov Yu.V., Shepelenko I.V., Osin R.A., Rudenko T.V.. (2024). Doslidzhennia shliakhiv pidvyshchennia operatyvnosti vykonannia diahnostychnykh operatsii elektronnykh system avtotraktornoi tekhniky [Research on ways to improve the efficiency of diagnostic operations of electronic systems in automotive and tractor equipment]. *Tsentralnoukrainskyi naukovyi visnyk – Central Ukrainian Scientific Bulletin, 9*(40), 144–151. DOI: https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.144-151. Retrieved from https://mapiea.kntu.kr.ua/pdf/9(40)_I/18.pdf [in Ukrainian].

5. Bernardi, P., Filipponi, G., Sonza Reorda, M., Appello, D., Bertani, C., & Tancorre, V. (2023). Collecting diagnostic information through dichotomic search from Logic BIST of failing in-field automotive SoCs with delay faults. *26th International Symposium on Design and Diagnostics of Electronic Circuits and Systems (DDECS)*. DOI: https://doi.org/10.1109/DDECS57882.2023.10139670. Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/10139670/keywords#keywords [in English].

6. Santhosh Kumar, P.V., & Keshava Murthy, G.N. (2022). Notice of removal: Implementation of automotive sensor tester for engineers at OEMs and vehicle service agencies using Raspberry Pi. *IEEE 3rd Global Conference for Advancement in Technology (GCAT)*. DOI: https://doi.org/10.1109/GCAT55367.2022.9972090. Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/9972090/authors#authors [in English].

7. Kathiresh, M., Neelaveni, R., Adwin Benny, M., & Jeffrin Samuel Moses, B. (2021). Vehicle diagnostics over internet protocol and over-the-air updates. In *EAI/Springer innovations in communication and computing* (pp. 89–100). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-59897-6_5. Retrieved from https://www.springerprofessional.de/en/vehicle-diagnostics-over-internet-protocol-and-over-the-air-upda/19102096 [in English].

8. Bidkar, S., Patil, S.L., & Shinde, P. (2021). Virtual ECU development for vehicle diagnostics software testing using UDS protocol. *Asian Conference on Innovation in Technology (ASIANCON)*. DOI: https://doi.org/10.1109/ASIANCON51346.2021.9544542. Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/9544542 [in English].

9. Cheng, Y., Porpora, F., D'Arpino, M., & Rizzoni, G. (2021). Cost analysis in different battery pack architectures considering protection, monitoring, and diagnostics. *IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*. DOI: https://doi.org/10.1109/ITEC51675.2021.9490170. Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/9490170 [in English].

10. Sonar, K.A., Chopade, N.B., & Rajani, P.K. (2024). Cloud-integrated braking ECU with ESP technology. *8th International Conference on Computing, Communication, Control and Automation (ICCUBEA)*. DOI: https://doi.org/10.1109/ICCUBEA61740.2024.10774736. Retrieved from https://ieeexplore.ieee.org/document/10774736 [in English].

УДК 62-97; 519.876.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.8

Г. В. ГРИГОРЧУК
доктор філософії, доцент,
доцент кафедри фізико-математичних наук
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-1674-9828

Л. І. ГРИГОРЧУК
кандидат педагогічних наук, доцент,
доцент кафедри інженерії програмного забезпечення
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0000-0003-0924-5090

Н. А. ГЛОВИН
здобувач освіти
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
ORCID: 0009-0006-7965-6839

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ЙМОВІРНОСТЕЙ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ

На сьогоднішній день однією з головних проблем у бізнесі є постійна невизначеність, що може виникати через зміну ринкових умов, поведінку конкурентів, світовий прогрес та інші фактори. При управлінні проектами важливо вчасно звернути увагу на визначення ризику в процесі оцінки доцільності прийняття тих чи інших рішень. Метою аналізу ризику є надання потенційним партнерам необхідної інформації та даних для прийняття рішень про доцільність участі в проекті та розробки заходів по захисту від можливих фінансових втрат. Теорія ймовірностей дозволяє оцінити ризик, що виникає за таких обставин, але побудова точних моделей потребує детальних даних і значного обсягу попередньої інформації, що не завжди доступна. Випадки, коли дані є неповними або неточними, можуть призвести до помилкових прогнозів і невиправданих рішень. Тому управління ризиками, пов'язаними з розробкою, є важливою частиною бізнес-аналізу. Це забезпечує те, що потенційні виклики та невизначеності не перешкодять просуванню чи успіху проекту. Бізнес-аналітики (BA) відіграють ключову роль у виявленні, оцінці та зменшенні ризиків для досягнення цілей проекту. Документування результатів розрахунків дозволяє аналітику зберігати дані про ймовірності ризиків, а регулярне оновлення моделей на основі нових даних гарантує їхню актуальність Ця стаття висвітлює основні теми, що охоплюють ключові обов'язки та методи ефективного управління ризиками бізнес-аналітиків шляхом використання теорії ймовірностей

Ключові слова: *бізнес-аналітика, теорія ймовірностей, ризики експоненціальний розподіл, рівномірний розподіл, нормальний розподіл.*

G. V. GRYGORCHUK
Doctor of Philosophy, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Physical and Mathematical Sciences
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-1674-9828

L. I. GRYGORCHUK
Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Software Engineering
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0003-0924-50906

N. A. GLOVIN
Education Seeker
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0009-0006-7965-6839

USING PROBABILITY THEORY TO ANALYZE AND OPTIMIZE BUSINESS PROCESSES

In today's business world, one of the main challenges is constant uncertainty, which can arise due to changing market conditions, competitor behavior, global progress, and other factors. In project management, it is crucial to identify risks in a timely manner when assessing the feasibility of making certain decisions. The goal of risk analysis is to provide potential partners with the necessary information and data to make informed decisions about participating in a project and to develop measures to protect against possible financial losses. Probability theory allows for risk assessment under such circumstances, but building accurate models requires detailed data and a significant amount of prior information, which is not always available. Cases where data is incomplete or inaccurate can lead to erroneous forecasts and unjustified decisions. Therefore, managing risks associated with development is an essential part of business analysis. This ensures that potential challenges and uncertainties do not hinder the progress or success of a project. Business analysts (BA) play a key role in identifying, assessing, and mitigating risks to achieve project goals.To effectively address complex problems related to probabilistic modeling and risk management, business analysts and programmers often turn to modern programming languages. Documenting calculation results allows analysts to store data on risk probabilities, while regularly updating models based on new data ensures their relevance. This article highlights key topics covering the primary responsibilities and effective risk management methods of business analysts through the use of probability theory. Applying probability theory to risk assessment is an effective method for forecasting and ensuring the resilience of business projects. It is crucial that the risk assessment process is based on reliable and accurate data, enabling businesses to reduce the likelihood of making incorrect decisions and minimize potential losses.

Key words: *business analytics, probability theory, risks exponential distribution, uniform distribution, normal distribution.*

Постановка проблеми

На сьогоднішній день однією з головних проблем у бізнесі є постійна невизначеність, що може виникати через зміну ринкових умов, поведінку конкурентів, світовий прогрес та інші фактори. При управлінні проектами важливо вчасно звернути увагу на визначення ризику в процесі оцінки доцільності прийняття тих чи інших рішень. Метою аналізу ризику є надання потенційним партнерам необхідної інформації та даних для прийняття рішень, про доцільність участі в проекті та розробки заходів по захисту від можливих фінансових втрат.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Аналіз наявних праць вітчизняних науковців проблем невизначеності та ризику дозволяє стверджувати, що здебільшого теоретичні дослідження присвячені аналізу причин виникнення, класифікації та методам кількісної оцінки ризиків, менше уваги приділяється якісним методам з врахуванням впливу неекономічних факторів на фінансовогосподарську діяльність.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є глибоке дослідження взаємодії програмування та бізнес-сфери, зосереджене на аналізі впливу похибок певних подій на очікувані результати. Робота спрямована на вивчення методів прогнозування, оцінки ризиків і мінімізації негативного впливу невизначеності, а також на розробку практичних підходів, які дозволяють покращити точність і ефективність прийняття рішень у бізнесі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Бізнес-аналітика – це «наука аналізу» (поглибленого аналізу). Вона передбачає застосування під час аналізу явищ та процесів великих баз даних (big date), широкого кола аналітичних показників, статистичних і математичних методів, комп'ютерних технологій і програмного забезпечення для прийняття управлінських рішень [1]. При управлінні проектами важливо вчасно звернути увагу на визначення ризику в процесі оцінки доцільності прийняття тих чи інших рішень. Метою аналізу ризику є надання потенційним партнерам необхідної інформації та даних для прийняття рішень про доцільність участі в проекті та розробки заходів по захисту від можливих фінансових втрат.

Аналіз ризиків поділяють на два види: кількісний та якісний. Кількісний аналізризику повинен дати можливість визначити число та розміри окремих ризиків та ризику проекту в цілому. Якісний аналіз визначає фактори, межі та види ризиків. Для аналізу ризику використовують метод аналогії, метод експертних оцінок, розрахунково-аналітичний метод та статистичний метод.

Метод аналогій передбачає використання даних по інших проектах, які вже виконані. Цей метод використовується страховими компаніями, які постійно публікують дані про найбільш важливі зони ризику та понесені витрати [2].

Експертний метод, який відомий як метод експертних оцінок, стосовно підприємницьких проектів може бути реалізований шляхом вивчення думок досвідчених керівників та спеціалістів. При цьому доцільно встановити показники найбільш допустимих, критичних та катастрофічних втрат, маючи на увазі як їх рівень так і ймовірність.

Розрахунково-аналітичний метод базується на теоретичних уявленнях. Хоча прикладна теорія ризику добре розроблена лише для страхового та грального ризику.

Розглядаючи питання методики визначення ризику, слід звернути увагу, що початковим пунктом в аналізі ризику проекту є встановлення невизначеності, притаманної грошовим потокам проекту. Цей аналіз можна проводити

декількома шляхами, починаючи з неформального судження до комплексних економічних та статистичних аналізів, що включають самостійні підрахунки до великомасштабних комп'ютерних моделей. Для ефективного вирішення складних задач, пов'язаних з моделюванням ймовірнісних розподілів та управлінням ризиками, бізнес-аналітики і програмісти часто звертаються до сучасних мов програмування. Завдяки своїй гнучкості та потужним бібліотекам, програмування дає можливість автоматизувати складні обчислення, оптимізувати процеси та отримувати точні результати за короткий час. Однією з таких мов, яка стала дуже популярною серед фахівців у різних галузях, є Python. Він не тільки простий у використанні, але й надає величезний набір бібліотек для статистичних обчислень, аналізу даних та візуалізації результатів. Саме Python дозволяє здійснювати складні ймовірнісні моделювання та оцінювати ризики з мінімальними зусиллями, що робить його ідеальним вибором для цих завдань. Розглянемо одну з найбільш популярних бібліотек Python, а саме NumPy, яка дозволяє аналітикам швидко будувати моделі, обчислювати ймовірності і графічно відображати результатNumPy (скорочення від numerical python) – це бібліотека з відкритим вихідним кодом для мови програмування Python, що надає підтримку великих багатовимірних масивів та матриць з великою колекцією математичних функцій високого рівня для роботи з цими масивами. NumPy є основною бібліотекою для наукових обчислень на Python. Він надає високопродуктивний багатовимірний об'єкт масиву ndarray та інструменти для роботи з цими масивами [3, 4]. Розглядаючи питання методики визначення ризику, слід звернути увагу, що початковим пунктом в аналізі ризику проекту є встановлення невизначеності, притаманної грошовим потокам проекту. Цей аналіз можна проводити декількома шляхами, починаючи з неформального судження до комплексних економічних та статистичних аналізів, що включають самостійні підрахунки до великомасштабних комп'ютерних моделей. Завдяки застосуванню принципів теорії ймовірностей бізнес-аналітик може розрахувати ймовірність настання різних подій, допомагаючи компанії уникати потенційних ризиків або ефективно ними керувати. Основні функції аналітика в цьому процесі включають:

Збір і аналіз інформації: Через інтерв'ю, ринкові дослідження та опитування аналітик з'ясовує чинники ризику, що впливають на бізнес, та оцінює ймовірність їх настання. Це дозволяє створити базу для моделей прогнозування, враховуючи як історичні дані, так і поточні ринкові умови.

Розробка ймовірнісних моделей:

Рівномірний розподіл: Застосовується, коли кожен результат або подія має однакову ймовірність настання, наприклад, при прогнозуванні попиту для однакових часових інтервалів. Формула ймовірності для подій, що мають рівномірний розподіл, може бути представлена як $P(X = x) = \frac{1}{b-a}$, де *aib* – межі інтервалу.

Нормальний розподіл: Використовується для моделювання коливань попиту або інших показників, що мають тенденцію до середнього значення. Аналітик може передбачити відхилення від середнього значення, розраховуючи ймовірність через функцію щільності нормального розподілу: $f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, де μ – середнє значення, а σ – стандартне відхилення. Ця модель дозволяє аналітику прогнозувати ймовірність настання відхилень у межах одного або двох стандартних відхилень.

Експоненціальний розподіл: Підходить для моделювання часу між подіями, наприклад, відновлення після збоїв. Ймовірність відсутності події до певного моменту часу *t* розраховується за формулою $P(T > t) = e^{-\lambda t}$, де λ – інтенсивність події. Це допомагає прогнозувати час до настання таких подій, як технічні збої, і планувати стратегії з їх мінімізації [5].

Презентація рішень для клієнта: Використовуючи ці розподіли, аналітик створює прогнозовані моделі, що демонструють ймовірність настання різних подій. На основі таких даних аналітик пропонує рекомендації, які допомагають клієнту зменшити невизначеність і приймати обґрунтовані рішення. Наприклад, клієнту можна показати, як застосування нормального розподілу дозволяє передбачити сезонні коливання попиту.

Консультування з управлінням ризиками: Використовуючи результати моделей, аналітик надає клієнту стратегії для управлінням ризиками. Наприклад, при високій ймовірності збоїв, прогнозованих експоненціальним розподілом, рекомендується оптимізувати бізнес-процеси для зменшення часу між відновленнями.

Документування та відстеження ризиків: Документування результатів розрахунків дозволяє аналітику зберігати дані про ймовірності ризиків, а регулярне оновлення моделей на основі нових даних гарантує їхню актуальність.

Рівномірний розподіл

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt

def uniform_distribution(a, b, critical_interval=(2, 8)):
    «»»
    Оцінює ризик і візуалізує рівномірний розподіл для заданого інтервалу [a, b].
```

```
   :param a: початок інтервалу
   :param b: кінець інтервалу
   :param critical_interval: критичний інтервал для оцінки ризику
   «»»
   x_values = np.linspace(a - 2, b + 2, 10)
   probability = 1 / (b - a)
   y_values = [probability if a <= x <= b else 0 for x in x_values]

   # Розрахунок ризику як ймовірності потрапляння за межі критичного інтервалу
   risk = (critical_interval [0] - a) * probability + (b - critical_interval [1]) *
probability
   print(«Ризик для рівномірного розподілу:», round(risk, 2))

   # Вивід результатів
   print(«Рівномірний розподіл (Uniform Distribution):»)
   for x, y in zip(x_values, y_values):
   print(f»X = {x:.2f}, Ймовірність = {y:.2f}»)

   # Візуалізація
   plt.figure(figsize=(8, 5))
   plt.step(x_values, y_values, label=f'Uniform Distribution [{a}, {b}]', color='blue',
where='mid')
   plt.scatter(x_values, y_values, color='blue', s=50)
   plt.axvline(critical_interval [0], color='red', linestyle='--', label='Критичний
інтервал')
   plt.axvline(critical_interval [1], color='red', linestyle='--')
   plt.title('Рівномірний розподіл з оцінкою ризику')
   plt.xlabel('X')
   plt.ylabel('Щільність ймовірності')
   plt.ylim(0, 1.1 * max(y_values))
   plt.legend()
   plt.grid(True)
   plt.show()

# Виклик функції
uniform_distribution(0, 10)
```

```
Ризик для рівномірного розподілу: 0.4
Рівномірний розподіл (Uniform Distribution):
X = -2.00, Ймовірність = 0.00
X = -0.44, Ймовірність = 0.00
X = 1.11, Ймовірність = 0.10
X = 2.67, Ймовірність = 0.10
X = 4.22, Ймовірність = 0.10
X = 5.78, Ймовірність = 0.10
X = 7.33, Ймовірність = 0.10
X = 8.89, Ймовірність = 0.10
X = 10.44, Ймовірність = 0.00
X = 12.00, Ймовірність = 0.00
```

Рис. 1. Результат обчислення програми рівномірного розподілу

Графік, що зображено на рисунку 2 показує рівномірний розподіл для інтервалу [0, 10], де кожне значення *X* між 0 і 10 має однакову ймовірність, що дорівнює 0.1. Рівномірний розподіл застосовується, коли події мають однакову ймовірність в заданому діапазоні. Сині точки позначають окремі значення ймовірності на графіку, розміщені на основній лінії розподілу. Суцільна синя лінія (між 0 і 10) ілюструє рівномірну щільність ймовірності, що дорівнює 0.1 в межах інтервалу [0, 10]. Це означає, що будь-яке значення в цьому інтервалі має однакову ймовірність. В свою чергу, червоні вертикальні лінії показують межі критичного інтервалу [4], який використовується для оцінки ризику.

Стосовно значення X поза інтервалом [0,10] (наприклад, –2.00 та 12.00) мають ймовірність 0, що видно на графіку як точки, що лежать на рівні 0. Для значень X всередині інтервалу [0, 10] (наприклад, $X = 1.11, 2.67, \ldots, 8.89 X = 1.11, 2.67, \ldots, 8.89$), щільність ймовірності є постійною і дорівнює 0.1. Ризик для рівномірного розподілу визначено як ймовірність, що значення X випадає за межі критичного інтервалу [2, 8]. Також на Рис. 1 розраховано ризик, що становить 0.4 – це означає, що є 40 % ймовірності, що значення потрапить поза межі критичного інтервалу.

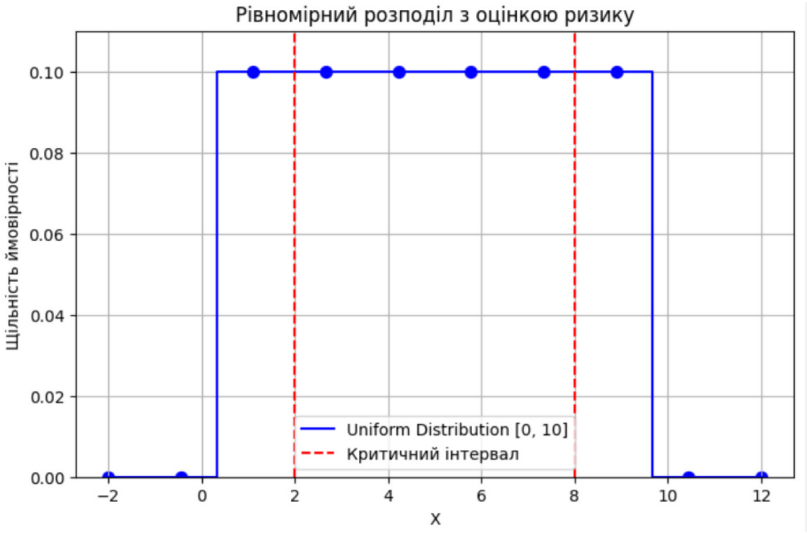


Рис. 2. Графік рівномірного розподілу з оцінкою ризику

Нормальний розподіл

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import norm
def normal_distribution(mu, sigma):
   Оцінює ризик і візуалізує нормальний розподіл для заданих параметрів.
   :param mu: середнє значення
   :param sigma: стандартне відхилення
   x_values = np.linspace(mu - 3 * sigma, mu + 3 * sigma, 10)
   y_values = norm.pdf(x_values, mu, sigma)
   # Розрахунок ризику (ймовірність бути за межами [mu - sigma, mu + sigma])
   risk = 2 * (1 - norm.cdf(mu + sigma, mu, sigma))
   print(«Ризик для нормального розподілу:», round(risk, 2))
   # Вивід результатів
   print(«\nНормальний розподіл (Normal Distribution):»)
   for x, y in zip(x_values, y_values):
      print(f»X = {x:.2f}, Щільність ймовірності = {y:.2f}»)
   # Візуалізація
   plt.figure(figsize=(8, 5))
   plt.plot(x_values, y_values, label=f'Normal Distribution (mu={mu}, sigma={sigma})',
color='green', marker='o', linestyle='-')
   plt.axvline(mu - sigma, color='red', linestyle='--', label='Критичний інтервал')
   plt.axvline(mu + sigma, color='red', linestyle='--')
   plt.title('Нормальний розподіл з оцінкою ризику')
   plt.xlabel('X')
   plt.ylabel('Щільність ймовірності')
   plt.ylim(0, 1.1 * max(y_values))
   plt.legend()
   plt.grid(True)
   plt.show()
# Виклик функції
normal_distribution(5, 1)
```

```
Ризик для нормального розподілу: 0.32

Нормальний розподіл (Normal Distribution):
X = 2.00, Щільність ймовірності = 0.00
X = 2.67, Щільність ймовірності = 0.03
X = 3.33, Щільність ймовірності = 0.10
X = 4.00, Щільність ймовірності = 0.24
X = 4.67, Щільність ймовірності = 0.38
X = 5.33, Щільність ймовірності = 0.38
X = 6.00, Щільність ймовірності = 0.24
X = 6.67, Щільність ймовірності = 0.10
X = 7.33, Щільність ймовірності = 0.03
X = 8.00, Щільність ймовірності = 0.00
```

Рис. 3. Результат обчислення програми нормального розподілу

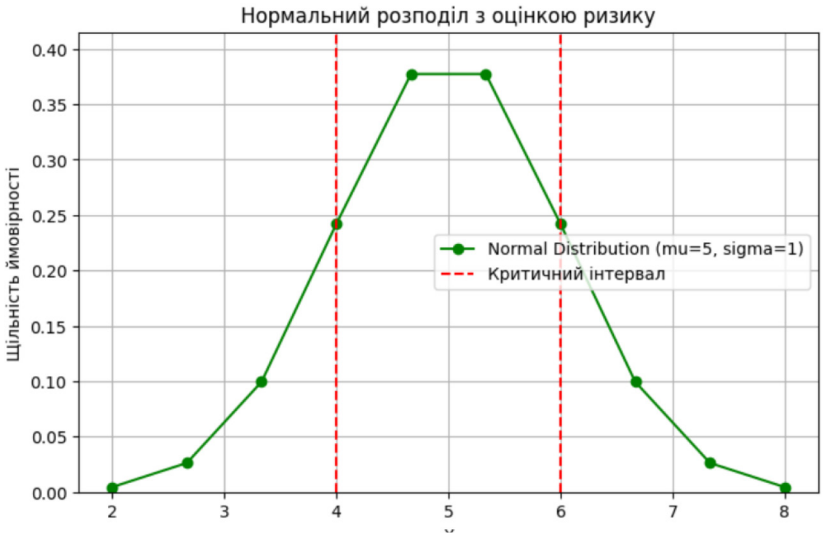


Рис. 4. Результат обчислення програми нормального розподілу

Цей графік ілюструє нормальний розподіл, а не рівномірний. На ньому зображено розподіл із середнім значенням (математичним сподіванням) μ = 5 та стандартним відхиленням σ = 1. Крива розподілу має дзвоно подібну форму, де значення X зосереджені ближче до середнього, а ймовірність поступово зменшується із збільшенням відхилення від цього середнього значення.

Зелені точки на графіку представляють значення щільності ймовірності для окремих значень X, що знаходяться у діапазоні від 2 до 8. Найвища щільність ймовірності досягається поблизу середнього значення $X = 5$, де вона становить приблизно 0.4. Виведені значення відображають щільність ймовірності для конкретних точок цього діапазону. У крайніх точках, таких як $X = 2.0$ або $X = 8.0$, ймовірність близька до нуля, тоді як поблизу середнього $X = 5.0$ вона максимальна, що відповідає центральному піку нормального розподілу. Червоні вертикальні лінії на графіку позначають критичний інтервал [2; 4], у межах якого значення X вважаються допустимими. Ризик для цього нормального розподілу становить 0.32, що означає, що з ймовірністю 32 % значення X можуть виходити за межі критичного інтервалу.

Цей графік може бути корисним для бізнес-аналітиків у процесі оцінки варіацій попиту або інших показників, що підпорядковуються нормальному розподілу. Наприклад, якщо критичний інтервал визначає прийнятні межі коливань попиту, то ризик у 32 % свідчить про ймовірність виходу за межі цих значень, що може потребувати додаткових заходів для управління або стабілізації процесу.

Експоненціальний розподіл

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.stats import expon
```

```
def exponential_distribution(lmbda, t_critical=4):
   Оцінює ризик і візуалізує експоненціальний розподіл для заданого значення лямбда
   :param lmbda: інтенсивність події
   :param t_critical: критичний час для оцінки ризику
   x_values = np.linspace(0, 10 / lmbda, 10)
   y_values = lmbda * np.exp(-lmbda * x_values)
   # Розрахунок ризику (ймовірність, що час перевищить t_critical)
   risk = np.exp(-lmbda * t_critical)
   print(«Ризик для експоненціального розподілу:», round(risk, 2))
   # Вивід результатів
   print(«\nЕкспоненціальний розподіл (Exponential Distribution):»)
   for x, y in zip(x_values, y_values):
   print(f»Час = {x:.2f}, Щільність ймовірності = {y:.2f}»)
   # Візуалізація
   plt.figure(figsize=(8, 5))
   plt.plot(x_values, y_values, label=f'Exponential Distribution (lambda={lmbda})',
color='red', marker='o', linestyle='-')
   plt.axvline(t_critical, color='red', linestyle='--', label='Критичний поріг часу')
   plt.title('Експоненціальний розподіл з оцінкою ризику')
   plt.xlabel('Час')
   plt.ylabel('Щільність ймовірності')
   plt.ylim(0, 1.1 * max(y_values))
   plt.legend()
   plt.grid(True)
   plt.show()
# Виклик функції
exponential_distribution(0.5)
normal_distribution(5, 1)
```

```
Ризик для експоненціального розподілу: 0.14

Експоненціальний розподіл (Exponential Distribution):
Час = 0.00, Щільність ймовірності = 0.50
Час = 2.22, Щільність ймовірності = 0.16
Час = 4.44, Щільність ймовірності = 0.05
Час = 6.67, Щільність ймовірності = 0.02
Час = 8.89, Щільність ймовірності = 0.01
Час = 11.11, Щільність ймовірності = 0.00
Час = 13.33, Щільність ймовірності = 0.00
Час = 15.56, Щільність ймовірності = 0.00
Час = 17.78, Щільність ймовірності = 0.00
Час = 20.00, Щільність ймовірності = 0.00
```

Рис. 5. Результат обчислення програми експоненціального розподілу

Цей графік демонструє експоненціальний розподіл з параметром $\lambda = 0.5$. Експоненціальний розподіл зазвичай описує час до настання певної події (наприклад, час очікування між подіями), і на графіку видно, що ймовірність швидко знижується з плином часу.

На графіку експоненціального розподілу ми можемо побачити червону криву, яка представляє щільність ймовірності. Щільність ймовірності на графіку визначає, скільки ймовірностей для різних моментів часу існує, коли подія відбудеться. Наприклад, на самому початку (для часу $t = 0$) щільність ймовірності є максимальною – це означає, що подія має дуже високу ймовірність статися на самому початку. Зі збільшенням часу ймовірність швидко зменшується, і через кілька одиниць часу (наприклад, $t = 10$) вона майже досягає нуля, що свідчить про те, що подія стає малоймовірною з плином часу [5].

На графіку також присутня червона пунктирна лінія, яка позначає критичний поріг часу, наприклад, $t = 5$. Цей критичний час використовується для оцінки ризику того, що подія відбудеться після цього моменту. В даному

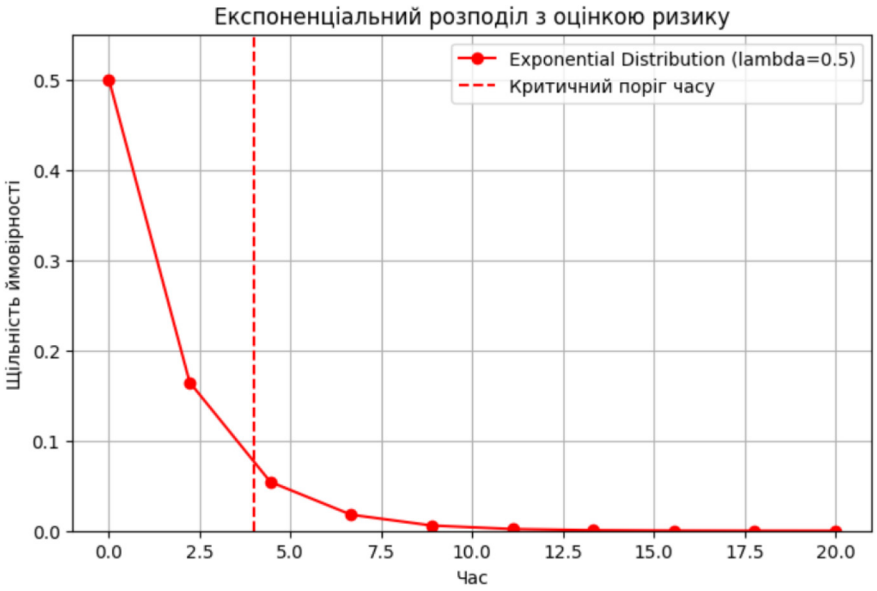


Рис. 6. Результат обчислення програми експоненціального розподілу

випадку ймовірність того, що подія станеться після цього часу ($t = 5$), становить 14 %, що означає, що ймовірність настання події після 5 одиниць часу є відносно низькою.

Оцінка ризику для експоненціального розподілу в даному контексті означає, що ймовірність того, що час до події буде більшим за цей критичний поріг, досить мала. У бізнес-аналітиці це може бути корисно для оцінки ймовірності затримок у процесах або реакціях на певні події. Наприклад, якщо ми використовуємо цей розподіл для планування часу очікування обробки замовлення або поломок технічного обладнання, ми можемо зрозуміти, що ймовірність затримки або порушення процесу є досить низькою, але все ж таки існує ризик, що він може статися. Таким чином, експоненціальний розподіл допомагає бізнес-аналітикам планувати ресурси, оптимізувати час очікування та вчасно оцінювати можливі затримки чи зриви.

Завдяки тому, що з часом ймовірність настання події різко зменшується, цей розподіл часто використовується для моделювання ситуацій, де події відбуваються швидко, але зі збільшенням часу їх ймовірність знижується. Розуміння та аналіз такого типу розподілу дозволяє бізнес-аналітикам або управлінцям приймати більш обґрунтовані рішення щодо планування ресурсів, налаштування часу очікування або прогнозування ризиків у діяльності.

Висновки

Управління ризиками є важливою складовою частиною бізнес-аналізу, особливо в умовах невизначеності ринку та змінних факторів, що впливають на діяльність компаній. Теорія ймовірностей надає інструменти для оцінки та прогнозування ризиків, проте правильне використання цих моделей потребує наявності точних і повних даних, що не завжди є доступними. Недосконалість даних може призвести до помилкових рішень, тому роль бізнес-аналітиків у виявленні та мінімізації ризиків є ключовою для успішного розвитку проектів.

Зокрема, рівномірний розподіл ймовірностей, який використовується для оцінки ризиків у статті, демонструє важливість точного визначення критичних інтервалів, на яких базуються прогнози. Графічне зображення рівномірного розподілу та розрахунок ризику в межах інтервалу дозволяє наочно продемонструвати ймовірність відхилення значення поза визначені межі. У даному випадку, ризик 40 % свідчить про значну ймовірність потрапляння значення поза критичний інтервал, що має важливе значення для прийняття рішень в умовах бізнес-невизначеності.

Отже, застосування теорії ймовірностей для оцінки ризиків є ефективним методом для прогнозування та забезпечення стійкості бізнес-проектів. Важливо, щоб процес оцінки ризиків базувався на надійних і точних даних, що дозволяє знижувати ймовірність прийняття неправильних рішень та мінімізувати потенційні втрати.

Проте не завжди ми зможемо управляти ризиками, використовуючи відповідні закони розподілу, тому можливі наступні ситуації, коли кількість можливих ризиків для більшості ініціатив може легко стати некерованою. Також може виявитися, що є можливим управляти лише підмножиною потенційних ризиків. Існує ймовірність того, що значні ризики не будуть виявлені.

Список використаної літератури

1. Сидорова А. В., Біленко Д. В., Буркіна Н. В. Бізнес-аналітика: навчально-методичний посібник. Вінниця. ДонНУ імені Василя Стуса, 2019. 104 с.

2. Васюта В. Б., Носенко М. В., Патріна Я. Г. Шляхи зниження ризиків підприємницької діяльності // *Галицький економічний вісник*. Т. : ТНТУ, 2023. Том 82. № 3. С. 201–207. (Підприємництво, торгівля та біржова діяльність).

3. Дорошенко А. Ю., Погорілий С. Д., Дорогий Я. Ю.; за ред. А. В. Анісімова. Програмування числових методів мовою Python підруч. Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2014. 640 с.

4. Коваленко С. М., Коваленко С. В., Шматко О. В. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Основи роботи з бібліотекою NumPy» з курсу «Обробка даних Python» для студентів спеціальностей 121 Інженерія програмного забезпечення, 122 Комп'ютерні науки, 124 Системний аналіз. Інформаційні системи і технології. Харків: НТУ «ХПІ», 2021.

5. Огірко О. І., Галайко Н. В. Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник. Львів : ЛьвДУВС, 2017. 292 с.

References

1. Sydorova A. V., Bilenko D. V., Burkina N. V. (2019) Biznes-analityka: navchalno-metodychnyi posibnyk [Business Analytics: Educational and Methodological Manual]. Vinnytsia : DonNU imeni Vasylia Stusa. [in Ukrainian].104 c.

2. Vasiuta V. B., Nosenko M. V., Patrina Ya. H. (2023) Shliakhy znyzhennia ryzykiv pidpryiemnytskoi diialnosti [Ways to Reduce Entrepreneurship Risks]. Halytskyi ekonomichnyi visnyk, vol. 82, no. 3, pp. 201–207. Ternopil : TNTU. (Pidpryiemnytstvo, torhivlia ta birzhova diialnist) [Entrepreneurship, Trade, and Exchange Activities]. [in Ukrainian].

3. Doroshenko A. Yu., Pohorilyi S. D., Dorohyi Ya. Yu.; za red. A. V. Anisimova. (2014) Programuvannia chyslovykh metodiv movoiu Python [Programming of Numerical Methods in Python]. Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr "Kyivskyi universytet". [in Ukrainian]. 640 c.

4. Kovalenko S. M., Kovalenko S. V., Shmatko O. V. (2021) Metodychni vkazivky do laboratornoi roboty "Osnovy roboty z bibliotekoiu NumPy" z kursu "Obrobka danykh Python" [Guidelines for the Laboratory Work "Basics of Working with the NumPy Library" for the Course "Python Data Processing"]. Kharkiv : NTU "KhPI". [in Ukrainian].

5. Ohirko O. I., Halaiko N. V. (2017) Teoriia imovirnostei ta matematychna statystyka: navchalnyi posibnyk [Probability Theory and Mathematical Statistics: Textbook]. Lviv : Lvivskyi derzhavnyi universytet vnutrishnikh sprav. [in Ukrainian]. 292 c.

УДК 620.92 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.9

Д. О. ДМИТРІЄВ
професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8200-351X

С. Г. КАТРІЧ
аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0006-7964-693X

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВ НА ПАРАМЕТРИ ЯКОСТІ В АДИТИВНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

У статті «Вплив температурно-технологічних умов на параметри якості в адитивному виробництві» досліджено вплив температурних параметрів технологічних умов на показники якості виробів, виготовлених за допомогою адитивного виробництва. Розглянуто основні проблеми, пов'язані з контролем показників температури під час процесу 3D-друку, та її вплив на точність відтворення геометричних форм, шорсткість поверхні, на необхідність постобробки а також на механічні властивості кінцевих продуктів. Проаналізовано вплив температурних факторів на якісні характеристики виробів за різними технологіями 3Д-друку – стеріолітографії (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне спікання металу (DLMS). Особлива увага приділена технології Fused Deposition Modeling (FDM), яка є однією з найпоширеніших у сучасному адитивному виробництві. Проаналізовано останні дослідження у цій сфері.

Встановлено, що параметри, такі як висота шару, швидкість друку та температура екструзії, мають критичний вплив на якість виробів. Зокрема, оптимальна висота шару 200 мкм забезпечує утворення краплі оптимальних розмірів, що сприяє надійному з'єднанню з попереднім шаром та покращує механічні властивості виробу. По джерелах науково технічної літератури визначено вплив температурно-технологічних параметрів на забезпечення необхідної якості виробів в адитивному виробництві. Температура екструзії суттєво впливає на формування початкових дефектів які ведуть до втрати механічних характеристик виробів в майбутньому. Зроблено аналітичний огляд адитивних технологій, акцентовано увагу на контролі температурних параметрів під час 3D-друку, які суттєво впливають на формування адгезійних шарів, фізичні характеристики та якість виробів, що підтверджується даними сучасних наукових досліджень.

Ключові слова: *адитивне виробництво, 3D-друк, FDM, стеріолітографія (SLA), селективне лазерне спікання (SLS), пряме лазерне спікання (DLMS), температурно-технологічні умови, якість 3Д-виробів.*

D. O. DMYTRIIEV
Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8200-351X

S. G. KATRICH
Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics
and Mechatronics
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0006-7964-693X

THE INFLUENCE OF TEMPERATURE-TECHNOLOGICAL CONDITIONS ON QUALITY PARAMETERS IN ADDITIVE MANUFACTURING

In the article «The Influence of temperature-technological conditions on quality parameters in additive manufacturing» the impact of temperature parameters of technological conditions on the quality indicators of products manufactured using additive production was studied. The main issues related to the control of temperature indicators during the 3D printing process and its influence on the accuracy of geometric form reproduction, surface roughness, the necessity of post-processing and the mechanical properties of the final products are considered. The influence of temperature factors on the quality characteristics of products based on various 3D printing technologies – stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS), direct laser metal sintering (DLMS) was analyzed. Special attention is paid to the Fused Deposition Modeling (FDM) technology, which is one of the most common in modern additive manufacturing. The latest research in this field is analyzed.

Parameters such as layer height, print speed, and extrusion temperature have been found to have critical effects on product quality. In particular, the optimal layer height of 200 μm ensures the formation of a droplet of optimal sizes, which contributes to a reliable connection with the previous layer and improves the mechanical properties of the product. According to sources in scientific and technical literature, the influence of temperature-technological parameters on ensuring the necessary quality of products in additive manufacturing has been determined. Extrusion temperature significantly affects the formation of initial defects that lead to the loss of mechanical characteristics of products in the future. An analytical review of additive technologies has been conducted, emphasizing the control of temperature parameters during 3D printing, which significantly affect the formation of adhesion layers, physical characteristics, and quality of products, as confirmed by modern scientific research data.

Key words: *additive manufacturing, 3D printing, FDM, stereolithography (SLA), selective laser sintering (SLS), direct laser sintering (DLMS), temperature and technological conditions, 3D-product quality.*

Постановка проблеми

Адитивне виробництво (Additive Manufacturing – (AM)), як приклад – найпоширенішій технології FDM (Fused Deposition Modeling), набуло широкого застосування у різних галузях промисловості завдяки можливості швидкого прототипування та виготовлення складних геометричних форм [13]. Забезпечення необхідної якості виробів залишається актуальною проблемою. Якість друку обумовлена багатофакторною взаємодією технологічних параметрів, характеристик обладнання та властивостей матеріалів що використовуються. Одним із ключових факторів, що впливають на якість кінцевого продукту, є температурно-технологічні умови процесу друку. Невідповідність температурних режимів до вимогам технологічного процессу може призвести до дефектів, таких як деформація, недостатня адгезія між шарами та нерівномірна поверхня виробу. Кожен матеріал, від термопластів у FDM до смол у Stereolithography (SLA), потребує точних налаштувань температури для досягнення необхідних результатів якості. Тому дослідження впливу температурних параметрів, як частини технологічних умов, на якість виробів є важливим завданням для досягнення необхідної якості, ефективності та надійності адитивного виробництва [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основними чинниками, що впливають на якість виготовлених виробів, є технологічні параметри. Визначення налаштувань температурного режиму, швидкісних параметрів друку, товщини формувального шару безпосередньо впливає на точність геометричних форм і якість поверхонь виробу. У статті «Вплив технологічних режимів адитивного 3D друку на якість сувенірної продукції» [2] досліджено залежність точності відтворення та шорсткості поверхні від налаштувань друку, таких як висота шару та швидкість друку. Інші дослідники акцентують увагу на важливості правильного налаштування температури екструдера та платформи для забезпечення якісного друку [1]. Також відзначається, що ретельний підбор температурних режимів сприяє покращенню фізико-механічних характеристик виробів. Проте, незважаючи на наявність численних досліджень, питання визначення таких температурно-технологічних умов для різних матеріалів та конструкцій залишається відкритим і потребує подальшого вивчення [12].

Дослідження науково технічної літератури для теоретичного аналізу та визначення необхідних температурно-технологічних параметрів процесу 3D-друку, які впливають на завдану якість виготовлених виробів. Вплив температури екструдера, температури платформи, швидкості друку та висоти шару на точність геометричних розмірів, шорсткість поверхні та механічні властивості виробів (міцність, жорсткість, твердість, пластичність). Отримання виробів із заданими механічними властивостями за процесом виробництва методом FDM-друку неможливо без вивчення впливу температурно-технологічних параметрів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Температурно-технологічні параметри є одним із ключових чинників, що визначають якість кінцевої продукції в адитивному виробництві. Правильний температурний контроль забезпечує стабільність геометричних розмірів виробів, рівномірність шарів, достатню міжшарову адгезію, а також оптимальні фізико-механічні характеристики матеріалу і як наслідок належну якість вироба. Незалежно від технології друку (Fused Deposition Modeling, Selective Laser Sintering (SLS), Stereolithography (SLA), Direct Metal Laser Sintering (DMLS), кожен матеріал має свої специфічні температурні режими, які необхідно враховувати для досягнення кращого результату [6]. Розглянемо два найпоширеніших температурних параметри у технології FDM, SLS та DMLS та SLA.

Однією з найпоширеніших технологій адитивного виробництва є моделювання методом наплавлення (FDM), при якому термопластичний матеріал розплавляється в екструдері та пошарово наноситься на друкарську платформу. У цьому процесі температура нагріву екструдера повинна відповідати конкретному типу полімеру. Наприклад, для термопластичного PLA (Polylactic Acid)-матеріалу робочий діапазон температури екструдера становить 180–220 °C, тоді як для ABS (Акрилонітрилбутадієнстирол) він сягає 230–250 °C. У разі невідповідного вибору температурного режиму можуть виникати такі проблеми:

– Вища 250 °C температура для ABS призводить до надмірного плавлення матеріалу, що викликає утворення ниткоподібних дефектів («stringing»), а також сповільнює застигання, що може спричинити деформації виробу.

– Температура нижча за 180 °C для PLA викликає погане зчеплення між шарами, що знижує механічну міцність виробу та збільшує ризик його розшарування [1].

В роботі [8] визначено важливу роль нагрівання платформи. Для ABS-пластика, який має тенденцію до деформації при охолодженні, рекомендована температура платформи становить 90–110 °C. Для PLA, що менш схильний до усадки, достатньо 50–60 °C. Невідповідність температури нагріву платформи може спричинити відшарування першого шару від друкарської платформи або ж виникнення внутрішніх напружень у виробі.

Стереолітографія (SLA) є однією з високоточних технологій 3D-друку, що працює на основі фотополімеризації рідких смол за допомогою ультрафіолетового лазера. У цій технології температура впливає на процес затвердіння полімеру:

– Вибір температури фотополімерної смоли, в більшості випадків робочий діапазон становить 20–30 °C. При нижчих температурах смола стає в'язкішою, що ускладнює її рівномірне нанесення, а при вищих – можливе передчасне затвердіння у непотрібних зонах [7].

– Постобробка. Після друку виріб піддається додатковому ультрафіолетовому опроміненню для завершення полімеризації. Якщо процес постобробки проводиться за неправильною температурою або надмірним рівнем УФ-випромінювання, матеріал може стати крихким або змінити свої розміри через внутрішні напруження [8].

Температурний контроль є одним із критичних факторів у процесі 3D-друку незалежно від вибраної технології. Відповідне налаштування температурних параметрів дозволяє:

– забезпечити рівномірне нанесення шарів та їхню міцність;
– зменшити ризики усадки, деформацій та залишкових напружень;
– покращити якість поверхні та механічні властивості виробу;
– підвищити повторюваність процесу та зменшити кількість дефектів.

Підбір відповідного температурного режиму є ключовим завданням для операторів 3D-друку, особливо при виробництві високоточних деталей для авіаційної, медичної та промислової галузей.

Вплив температури на якість продукції. Температурний режим у процесі адитивного виробництва має безпосередній вплив на кінцеві характеристики виробів, зокрема на міцність, щільність, точність геометричних розмірів, поверхневу якість і довговічність. Відхилення від встановлених температурних параметрів може призвести до різних дефектів, таких як міжшарова нестабільність, внутрішні напруження, тріщини, пористість та усадка. Для різних технологій адитивного виробництва цей вплив має свої особливості [12]. Наприклад, зміна межі обчисленої міцності [σ], МПа, виробів із PLA у функції температури екструдера Te, показано на рис. 1 точка максимальної міцності PLA [σ] = 35,1 МПа [1].

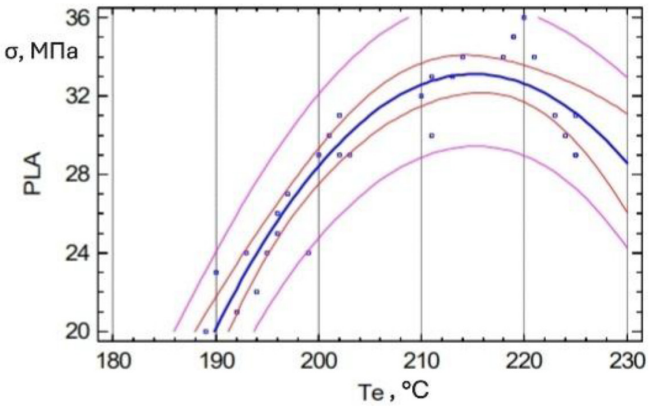


Рис. 1. Зміна межі міцності [σ], МПа, виробів із PLA у функції температури екструдера Te, °C

Одним із ключових аспектів є вплив температурного режиму на механічну міцність виробів. У випадку технології FDM температура екструдера визначає рівень міжшарової адгезії, що безпосередньо впливає на кінцеву жорсткість і міцність матеріалу. Наприклад, при надто низькій температурі (<190 °C для PLA) спостерігається слабке зчеплення між шарами, що може спричинити розшарування та ламкість виробу. У разі високих температур (>230 °C для PLA) надмірне розплавлення може викликати деформацію форми та зниження структурної цілісності [2].

У технологіях лазерного спікання (SLS) і лазерного плавлення металів (DMLS) температура впливає на якість спікання порошкових матеріалів. Недостатня температура лазерного впливу призводить до неповного спікання, утворення мікропор та зниження механічної міцності виробу. З іншого боку, надмірний температурний вплив може спричинити утворення внутрішніх напружень і мікротріщин, що суттєво зменшує довговічність конструкцій, особливо в авіаційній і медичній галузях.

Для технології холодного газодинамічного напилення (Cold Gas Dynamic Spraying CGDS) з використанням порошку титану, вплив температури показано на графіку на рис. 2, а саме, зі зростанням температури, спікання шару відбувається при значно низькому тиску [11].

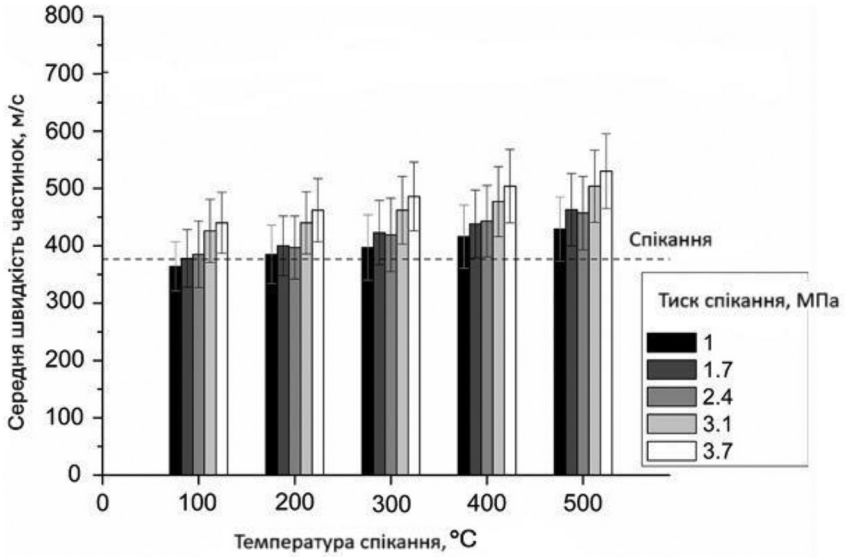


Рис. 2. Вплив температури на середню швидкість частинок та спікання для різного тиску

Температурний контроль є одним із головних факторів, що впливають на точність відтворення геометричних параметрів виробів. Наприклад, у технології FDM різниця температур між друкованим матеріалом і навколишнім середовищем може спричинити усадку або деформацію. Для ABS-пластику, який має високий коефіцієнт теплового розширення, необхідно використовувати нагріту камеру або платформу (90–110 °C) для зменшення ризику термічних деформацій.

У технологіях SLS та DMLS підтримка рівномірного температурного режиму в камері запобігає локальним деформаціям та нерівномірному стисканню виробів під час охолодження. Занадто швидке охолодження металевих деталей може викликати залишкові напруження, що призводять до викривлення конструкцій [3].

Якість поверхні друкованих виробів залежить від температурного режиму як під час друку, так і на етапі постобробки. Наприклад:

– у FDM підвищена температура екструдера може викликати утворення ниток («stringing») та нерівномірність шарів. Натомість ретельно обраний температурний режим дозволяє отримати гладку поверхню без необхідності додаткового шліфування;

– у SLA температура впливає на рівень полімеризації фотополімерної смоли, що визначає якість поверхні. Висока температура може спричинити перевищену полімеризацію, що робить матеріал крихким;

– у SLS та DMLS температура лазерного променя впливає на рівномірність спікання частинок порошку. При недостатньому нагріванні можуть утворюватися мікропори, що погіршує текстуру поверхні та потребує додаткової механічної обробки [3].

Температурні відхилення можуть спричинити наступні дефекти у 3D-друкованих виробах:

Дефекти, пов'язані з відхиленням температурного режиму

Дефект	Причина	Технології, де зустрічається
Розшарування (delamination)	температура екструдера або камери нижча за 190 °C	FDM, SLS
Деформація (warping)	Різке охолодження, недостатній нагрів платформи до 90 °C	FDM, SLS, DMLS
Мікропори	Недостатня температура спікання	SLS, DMLS
Перегрів	Надмірний температурний вплив	FDM, SLA, SLS
Внутрішні напруження	Різниця температур між шарами	DMLS, SLS

Для покращення якості друку та мінімізації дефектів необхідно застосовувати такі методи:

– калібрування температурних параметрів – підбір значень температури екструдера, платформи та камери відповідно до матеріалу;

– використання терморегульованих камер – стабілізація температурного режиму для зменшення ризику внутрішніх напружень;

– поступове охолодження металевих виробів – запобігання різкому термічному розширенню та стисненню;

– ретельний підбір параметрів лазерного впливу – баланс між температурою лазерного випромінювання та часом експозиції для уникнення перегріву або неповного спікання порошку;

– контроль постобробки – використання термічної обробки після друку для зміцнення матеріалу (відпал для металевих виробів, додаткове УФ-опромінення для SLA).

Температурний режим є одним із найбільш критичних параметрів у адитивному виробництві, оскільки він безпосередньо впливає на міцність, точність та довговічність виробів. Недотримання оптимальних температурних параметрів може спричинити значні дефекти, що унеможливлюють використання виробів у промислових і високотехнологічних сферах.

Подальші дослідження в цій галузі спрямовані на розробку адаптивних алгоритмів температурного контролю, що дозволять автоматично налаштовувати температурні параметри відповідно до матеріалу та конструктивних особливостей виробу.

Визначення та вибір температурних параметрів є одним із ключових завдань при впровадженні адитивного виробництва. Коректне налаштування температурного режиму дозволяє не лише підвищити якість друку, але й зменшити кількість дефектів, забезпечити механічну стійкість виробів, покращити міжшарову адгезію та підвищити точність геометричних параметрів. В останні роки з'явилося багато підходів до автоматизації цього процесу, що включають застосування датчиків, штучного інтелекту, адаптивного контролю та термічних [4].

У технології FDM одним із головних викликів є підтримання стабільної температури екструдера та платформи. Сучасні 3D-принтери оснащені PID (Proportional-Integral-Derivative)-регуляторами, які дозволяють автоматично підтримувати температуру в заданих межах.

Методи поліпшення якості 3Д друку включають:

– змінне нагрівання екструдера – для покращення зчеплення перших шарів температура екструдера на початку друку часто встановлюється на 5–10 °C вище технологічно визначеного значення, а після друку перших шарів знижується до стандартного рівня (наприклад, 210 °C → 200 °C для PLA);

– визначення та налаштування температури платформи – деякі принтери використовують градієнтний нагрів, при якому температура поступово знижується після друку 50–70 % моделі, що мінімізує ризик усадки. Наприклад, платформа може починати друк із 100 °C і поступово охолоджуватися до 80 °C у кінці процесу для ABS-пластику;

– контроль термічних деформацій – у промислових FDM-принтерах використовуються камери з активним підігрівом, які забезпечують рівномірний температурний режим під час друку великих моделей. Це дозволяє уникнути тріщин та розшарування матеріалу, особливо при друці великих конструкцій з інженерних полімерів, таких як PEEK (Polyether Ether Ketone) чи ULTEM (поліетерімід) [7].

У лазерному спіканні порошків (SLS) та лазерному плавленні металів (DMLS) ключовим фактором є підтримання стабільної температури у робочій камері та регулювання потужності лазера.

Методи поліпшення у SLS-друці:

– прецизійне керування температурою камери – підтримка стабільної температури (зазвичай на 10–20 °C нижче температури плавлення полімерного порошку) дозволяє мінімізувати термічні деформації. Наприклад, при друці з PA12(нейлон 12) температура камери встановлюється на рівні 170–185 °C;

– змінна потужність лазера – використання адаптивного контролю дозволяє варіювати потужність лазерного випромінювання залежно від геометрії друкуваної моделі. Це знижує ризик перегріву тонких елементів та недостатнього спікання у товстих шарах;

– контроль теплового балансу в процесі друку – у сучасних SLS-принтерах застосовуються системи багатоточкового вимірювання температури, які дозволяють автоматично регулювати локальні параметри процесу в режимі реального часу [7].

Методи вдосконалення у DMLS-друці:

– використання попереднього підігріву порошку – металеві порошки (Ti-6Al-4V, Inconel 718, AlSi10Mg) часто попередньо нагрівають до 200–500 °C перед друком, що зменшує залишкові напруження у матеріалі [10];

– градієнтне охолодження – щоб уникнути термічних тріщин, металеві вироби після друку охолоджують поступово. Наприклад, у деяких промислових установках використовується охолодження в середовищі аргону, що дозволяє знизити різницю температур між зовнішніми і внутрішніми шарами;

– застосування мультилазерних систем – сучасні DMLS-принтери обладнані декількома лазерами, які працюють синхронно, дозволяючи рівномірно розподіляти теплове навантаження на матеріал, що зменшує деформації під час друку складних геометричних об'єктів [8].

Останні дослідження у сфері адитивного виробництва показують, що комп'ютерне термічне моделювання може значно покращити якість друку [4].

Методи скінченних елементів при моделюванні (Finite Element Analysis – FEA) дозволяють прогнозувати зміну температури у різних зонах виробу під час друку та охолодження.

Термодинамічні симуляції використовуються для оптимізації траєкторії лазерного проміння у DMLS, що зменшує перегрів окремих зон та сприяє рівномірному розподілу напружень.

Машинне навчання для прогнозування дефектів – у промислових установках активно застосовуються алгоритми на основі зв'язку через (протоколи API) зі штучним інтелектом, які аналізують температурні показники в режимі реального часу та автоматично коригують параметри друку.

Ретельний підбір та визначення температурно-технологічних параметрів є важливим напрямом досліджень у сфері адитивного виробництва. Застосування автоматичних систем контролю температури, адаптивного нагріву та цифрових симуляцій дозволяє значно покращити якість продукції, підвищити точність друку та зменшити кількість дефектів. Подальші дослідження в цьому напрямку спрямовані на розробку розумних систем саморегуляції, що дозволять у реальному часі коригувати параметри друку відповідно до характеристик матеріалу та конструктивних особливостей виробу.

Висновки

Температурно-технологічні умови є одним із ключових факторів, що визначають якість продукції, виготовленої методами адитивного виробництва. Відповідне налаштування температурних параметрів безпосередньо впливає на механічну міцність виробів, точність геометричних розмірів, рівень міжшарової адгезії та поверхневу якість. Недотримання оптимального температурного режиму може спричинити виникнення різноманітних дефектів, таких як розшарування, пористість, внутрішні напруження, перегрів або термічні деформації.

У ході дослідження встановлено, що для кожної технології 3D-друку існують специфічні температурні режими, які необхідно суворо дотримуватися. Зокрема, в технології FDM стабільність температури екструдера та нагріву платформи забезпечує рівномірне нанесення шарів і запобігає деформаціям. У методах лазерного спікання та плавлення (SLS, DMLS) контроль температури лазерного випромінювання, нагріву камери та процесу охолодження дозволяє мінімізувати мікропористість і залишкові напруження в структурі матеріалу. Водночас, у технології SLA регулювання температури фотополімерної смоли є критичним для рівномірності полімеризації та механічної міцності виробу.

Вдосконалення температурно-технологічних параметрів включає впровадження сучасних методів керування температурою, таких як адаптивні регулятори PID (Proportional-Integral-Derivative), інтелектуальні сенсори, чисельне термічне моделювання та алгоритми машинного навчання. Використання таких технологій дозволяє не лише підвищити якість друкованих виробів, але й значно знизити відсоток браку та покращити економічну ефективність виробництва.

Результати таких досліджень мають практичне значення для різних сфер застосування адитивних технологій, зокрема в авіаційній, медичній, автомобільній промисловості та інженерному прототипуванні. Контроль температурних режимів є ключовим завданням для забезпечення високої якості кінцевої продукції та підвищення рівня надійності 3D-друкованих деталей.

Подальші дослідження в цій галузі повинні бути зосереджені на розробці інтелектуальних алгоритмів керування температурою у реальному часі, впровадженні нових матеріалів з покращеними термомеханічними характеристиками та використанні комплексних моделей прогнозування термічної поведінки під час друку. Інтеграція штучного інтелекту та автоматизованих систем регулювання температури дозволить зробити процес адитивного виробництва ще більш ефективним і стабільним.

Список використаної літератури

1. Саленко О. Ф., Орел В. М., Габузян Г. В., А. Костенко, Д. Цуркан. Вплив температури екструдованого філаменту на параметри міцності тонкостінних виробів. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта*: матеріали XXIII наук. техн. конф. (КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023р.). Київ, 2023. С. 185–189.

2. Володько М. Ю., Клименко Т. Є., Талімонова Н. Л. Вплив технологічних режимів адитивного 3D-друку на якість сувенірної продукції. *Технологія і техніка друкарства*. 2023. № 1(79). С. 46–58.

3. Гончарук О. О. Визначення впливу технологічних параметрів лазерного спікання на процес формування інструментальних композитів з НТМ. *Збірник наукових праць НТУУ «КПІ»*. Сер. *Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження*. 2016. № 1. С. 158–165.

4. Ковалевський С. В. Оптимізація технологічних систем на основі потокового моделювання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2020. № 2. С. 76–81.

5. Лісова Р. В., Лісовий О. В. Застосування адитивних технологій у виробництві та їхній вплив на бізнес-процеси. *Економічний аналіз*. 2019. № 4, т. 29. С. 68–77.

6. Манжілевський О. Д. Сучасні адитивні технології 3D друку. Особливості практичного застосування: навч. посіб. Вінниця: ВНТУ, 2021. С. 105.

7. Масючок О. П., Юрженко М. В., Колісник Р. В., Кораб М. Г. Адитивні технології полімерних матеріалів. *Автоматичне зварювання*. 2020. № 5. С. 53–60.

8. Слєпцов О. О., Осауленко С. І., Осипенко О. А., Грищенко Я. М. Інноваційні технології адитивного виробництва – проблеми та перспективи. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання* : колективна монографія за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції, м. Київ, 18 жовтня 2023 року / за ред. В. П. Плаван, А. О. Касич, О. О. Бутенко. Київ : КНУТД, 2023. С. 80–84.

9. 3D printing resolution: meaning, importance and optimization: веб-сайт. URL: https: // www. raise3d. com / blog / 3d-printing-resolution/ (дата звернення: 13.01.2025)

10. Pirohov D. O., Vorontsov B. S. Prospects Of Use And Processing Of Titanium Blanks Obtained By xBeam 3D Metal Printing Technology. *Technium Vol. 12, 2023*. ISSN: 2668-778X. С. 53–57.

11. D. MacDonald R., Ferna´ndez F., Delloro B. Cold Spraying of Armstrong Process Titanium Powder for Additive Manufacturing. *J. Therm Spray Tech. 2017*. DOI 10.1007/s11666-016-0489-2. С. 598–609.

12. Longfei Zhou, Jenna Miller, Jeremiah Vezza, Maksim Mayster, Muhammad Raffay, Quentin Justice, Zainab Al Tamimi, Gavyn Hansotte, Lavanya Devi, Sunkara and Jessica Bernat. Additive Manufacturing: A Comprehensive Review. *Sensors. 2024. 24, 2668*. https://doi.org/10.3390/s24092668

13. Г. О. Андрощук, Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1. С. 68–77.

References

1. Salenko, O. F., Orel, V. M., Gabuzyan, G. V., Kostenko, A., & Tsurkan, D. (2023). Influence of the temperature of the extruded filament on the strength parameters of thin-walled products. In Proceedings of the XXIII International Scientific and Technical Conference “Progressive Technology, Engineering and Education” (Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky, 2023, pp. 185–189). Kyiv : KPI.

2. Volodko, M. Yu., Klymenko, T. E., & Talimonova, N. L. (2023). The influence of technological modes of additive 3D printing on the quality of souvenir products. Technology and Printing Technique, 1(79), 46–58.

3. Honcharuk, O. O. (2016). Determination of the effect of technological parameters of laser sintering on the process of forming instrumental composites from NTM. Collection of Scientific Works of NTUU “KPI”. Series: Chemical Engineering, Ecology and Resource Conservation, 1, 158–165.

4. Kovalevskyi, S. V. (2020). Optimization of technological systems based on flow modeling. Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, 2, 76–81.

5. Lisova, R. V., & Lisovyi, O. V. (2019). Application of additive technologies in production and their impact on business processes. Economic Analysis, 29(4), 68–77.

6. Manzhilevskyi, O. D. (2021). Modern additive technologies of 3D printing. Features of practical application: Teaching manual. Vinnytsia: VNTU.

7. Masyuchok, O. P., Yurzhenko, M. V., Kolisnyk, R. V., & Korab, M. G. (2020). Additive technologies of polymer materials. Automatic Welding, 5, 53–60.

8. Sleptsov, O. O., Osaulenko, S. I., Osypenko, O. A., & Hryshchenko, Ya. M. (2023). Innovative technologies of additive manufacturing – problems and prospects. In V. P. Plavan, A. O. Kasych, & O. O. Butenko (Eds.), Education for a sustainable future: Ecological, technological, economic and socio-cultural issues: Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference, Kyiv, October 18, 2023 (pp. 80–84). Kyiv : KNUTD.

9. Raise3D. (2025, January 13). 3D printing resolution: Meaning, importance and optimization. Raise3D Blog. https://www.raise3d.com/blog/3d-printing-resolution/

10. Pirohov, D. O., & Vorontsov, B. S. (2023). Prospects of use and processing of titanium blanks obtained by xBeam 3D metal printing technology. Technium, 12, 53–57. ISSN: 2668-778X.

11. MacDonald, D. R., Fernández, F., & Delloro, B. (2017). Cold spraying of Armstrong Process titanium powder for additive manufacturing. Journal of Thermal Spray Technology, 26, 598–609. https://doi.org/10.1007/s11666-016-0489-2

12. Zhou, L., Miller, J., Vezza, J., Mayster, M., Raffay, M., Justice, Q., Al Tamimi, Z., Hansotte, G., Devi, L. S., & Bernat, J. (2024). Additive manufacturing: A comprehensive review. Sensors, 24(9), 2668. https://doi.org/10.3390/s24092668

13. Androschuk, H. O. (2017). Additive technologies: Prospects and problems of 3D printing. Science, Technologies, Innovations, 1, 68–77.

УДК 62-8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.10

А. В. КАСЬЯН
аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-9820-658X

О. С. ГАЛЕЦЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-5733-5846

РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПНЕВМАТИЧНОГО ПОЗИЦІЙНОГО ПРИВОДУ

У цій статті представлено розробку математичної моделі позиційного пневматичного приводу з використанням безштокового пневматичного циліндра та результати перевірки математичної моделі на достовірність. Окрім цього, в роботі представлено підхід до створення візуалізацій математичних моделей в програмному середовищі Matlab Simulink, який спрощує розуміння і наочність даних систем. Створення енергоефективного позиційного пневматичного приводу є важливим через численні промислові завдання, які вимагають використання пневматичних систем. Основною метою цього дослідження є розробка математичної моделі, яка полегшить швидшу перевірку та інтеграцію позиційного приводу в інші системи.

Методологія передбачає побудову діаграми, яка ілюструє взаємозв'язки між компонентами приводу, де кожен елемент та взаємозв'язки між з'єднаними елементами представлені у вигляді системи рівнянь. Ці рівняння являють собою математичну модель пневматичного позиційного приводу, яка реалізована в середовищі Matlab Simulink. Дана модель перевірена на адекватність, залежність переміщення від тиску та часу подачі повітря відповідає фізичним законам аеромеханіки. Також модель реалізує позиціонування з різною точністю в залежності від діаметру пневматичного циліндру. Результатом є функціональна математична модель пневматичного позиційного приводу, здатна проводити попередні аналізи для безштокових пневматичних циліндрів різних розмірів.

Модель демонструє, що поршень може досягати проміжних положень під впливом рівня тиску та тривалості подачі стисненого повітря. Ця математична модель має потенціал для майбутнього використання для тестування алгоритмів позиціонування, оптимізації та прискорення розробки систем на основі цього приводу. За допомогою попереднього аналізу приводу з використанням математично моделі, можна визначити необхідну кількість або час подачі повітря, тобто провести навчання приводу, що дозволить зекономити на вартості точного обладнання та зменшити знос фізичного приводу, за рахунок зменшення налагоджувальних ітерацій, які будуть виконуватися за допомогою математичної моделі.

Ключові слова: *пневматичний позиційний привід, позиційний, енергоефективний привід, математична модель, безштоковий циліндр.*

A. V. KASIAN
Postgraduate Student at the Department of Applied Hydroaeromechanics
and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0008-9820-658X

O. S. HALETSKII
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Hydroaeromechanics
and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-5733-5846

DEVELOPMENT OF A MATHEMATICAL MODEL OF A PNEUMATIC POSITION DRIVE

This article presents the development of a mathematical model of a positional pneumatic actuator using a rodless pneumatic cylinder and the results of checking the mathematical model for reliability. In addition, the paper presents an approach to creating visualizations of mathematical models in the Matlab Simulink software environment, which simplifies the understanding and clarity of these systems. Creating an energy-efficient positional pneumatic actuator is important due to the numerous industrial tasks that require the use of pneumatic systems. The main goal of this research is to develop a mathematical model that will facilitate faster verification and integration of the positional actuator into other systems.

The methodology involves constructing a diagram illustrating the relationships between the drive components, where each element and the relationships between the connected elements are presented in the form of a system of equations. These equations represent a mathematical model of a pneumatic positional drive, which is implemented in the Matlab Simulink environment. This model has been tested for adequacy, the dependence of the displacement on the pressure and time of air supply corresponds to the physical laws of aeromechanics. The model also implements positioning with varying accuracy depending on the diameter of the pneumatic cylinder. The result is a functional mathematical model of a pneumatic positional drive, capable of conducting preliminary analyses for rodless pneumatic cylinders of various sizes.

The model demonstrates that the piston can reach intermediate positions under the influence of the pressure level and duration of the compressed air supply. This mathematical model has the potential for future use to test positioning algorithms, optimize and accelerate the development of systems based on this drive. By preliminary analysis of the drive using a mathematical model, it is possible to determine the required amount or time of air supply, i.e., to train the drive, which will save on the cost of precision equipment and reduce wear on the physical drive, by reducing the number of tuning iterations that will be performed using the mathematical model.

Key words: *pneumatic positioning actuator, positioning, energy-efficient actuator, mathematical model, rodless cylinder.*

Постановка проблеми

У промисловості приводи використовуються для автоматизації та точного позиціонування різних механізмів. Серед доступних технологій найбільшого поширення набули гідравлічні та електричні приводи, що мають високу точність та енергоефективність. Однак у ряді промислових застосувань кращим варіантом може бути пневматичний привід завдяки його простоті, надійності та здатності функціонувати у складних умовах. Незважаючи на ці переваги, основними перешкодами на шляху широкого впровадження пневматичних систем залишаються їхня низька енергоефективність та складність точного позиціонування.

Ці обмеження зумовлені нелінійністю пневматичної поведінки, стисненням повітря, втратами на тертя та теплопередачу. В результаті керування такими системами вимагає розробки інноваційних методів, здатних підвищити точність позиціонування та ефективність витрачання енергії. Вирішення цієї проблеми є актуальним викликом, оскільки успішна реалізація енергоефективного позиційного пневматичного приводу відкриє нові перспективи застосування цієї технології в автоматизованих виробничих процесах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Системи позиційного приводу є важливим елементом промислової автоматизації, перебуваючи у центрі уваги дослідників, які розробляють нові стратегії управління та конструктивні рішення [1]. В останні роки активно вивчаються можливості пневматичних приводів як економічно вигідної та надійної альтернативи до виконання завдань точного позиціонування [2]. Однак складність управління цими системами, пов'язана з їхньою нелінійністю та динамічними характеристиками, вимагає застосування сучасних технологій для підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Сучасні дослідження зосереджені на розвитку гібридних контролерів, алгоритмів машинного навчання та адаптивних методів управління, що дозволяють компенсувати небажані ефекти, що виникають під час використання пневматичних систем [3]. Крім того, істотна увага приділяється удосконаленню конструкцій приводів та застосуванню нових матеріалів, що сприяє підвищенню їхньої енергоефективності та точності [2].

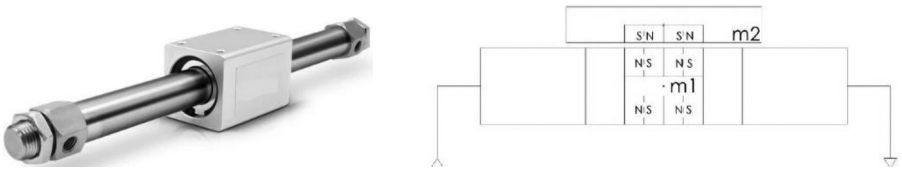
Незважаючи на досягнуті успіхи, пневматичні приводи, як і раніше, поступаються електричним і гідравлічним аналогам за рівнем управління. Розробка нових рішень у цій галузі дозволить подолати існуючі обмеження та розширити застосування пневматичних приводів в автоматизованих системах, що є актуальним завданням сучасної науки та техніки.

Формулювання мети дослідження

Створення математичної моделі позиційного пневматичного приводу на базі безштокового циліндру, що дозволяє проводити аналіз приводу вибраного типорозміру та параметрів системи.

Викладення основного матеріалу дослідження

Пропонується в якості пневматичного позиційного приводу використовувати дану схему включення, якщо він буде виконуватися на базі безштокового пневмоциліндру (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Безштоковий пневмоциліндр: *а* – ілюстрація; *б* – принципова схема

Пневматичний безштоковий циліндр, показаний на рис. 1, працює за допомогою простого, але ефективного механізму. Стиснене повітря вводиться в ліву камеру циліндра, змушуючи внутрішній поршень почати рухатися вправо. Поршень оснащено постійним магнітом, спеціально розробленим із полярністю, протилежною полярності іншого магніту, прикріпленого до рухомої платформи, розташованої поза циліндром. Ця конфігурація створює магнітну взаємодію між двома компонентами, гарантуючи, що зовнішня платформа відображає лінійний рух поршня з високою точністю. Примітно, що між поршнем і платформою немає фізичного чи механічного зв'язку; весь рух керується виключно магнітною силою. Така конструкція має ряд переваг. По-перше, це дозволяє платформі плавно ковзати по довжині циліндра без обмежень або потенційних точок відмови, пов'язаних із механічними з'єднаннями. По-друге, відсутність прямого контакту зменшує знос, сприяючи загальній довговічності та надійності системи. Нарешті, ця конфігурація забезпечує більш компактну та легку конструкцію, завдяки чому циліндр особливо добре підходить для застосувань, де обмежений простір або важливо мінімізувати вагу рухомих компонентів. Поєднання цих характеристик забезпечує надійне, ефективне та універсальне рішення для досягнення лінійного руху в широкому діапазоні промислових і автоматизованих установок.

Принцип дії позиціонування приводу базується на знаходженні необхідної кількості повітря, яку необхідно подати в циліндр, щоб відбулося переміщення на задану відстань [4]. Однак, даний метод є складним в реалізації, тож пропонується знаходити час перемикання розподільників за допомогою симуляції на основі математичної моделі, що дозволить виконати задане переміщення.

Для побудови моделі було використано циклічно-модульний підхід [5]. Це скоротить час реалізації проекту та прискорить перевірку конкретних припущень щодо продуктивності та функціональності системи. Математична модель необхідна для вибору оптимальних параметрів приводної системи, а також може служити основою для проектування різних типорозмірів подібних приводів.

Також, в майбутньому, дану модель можна буде використати для інтеграції машинного навчання, щоб спростити схему, що визначає задану кількість повітря, та зменшити кількість і ціну обладнання. Тобто, визначати необхідну кількість повітря не під час роботи системи, а в симуляції, що окрім економії ресурсів і часу, також може зменшити знос системи, так як можна буде зменшити кількість циклів для налагоджування.

Через складність процесу функціонування приводу для його моделювання було застосовано циклічно модульний підхід [5]. Математична модель приводу була розділена на складові: модель пневматичного безшточного циліндра двосторонньої дії та модель пневматичного розподільника двосторонньої дії (рис. 2).

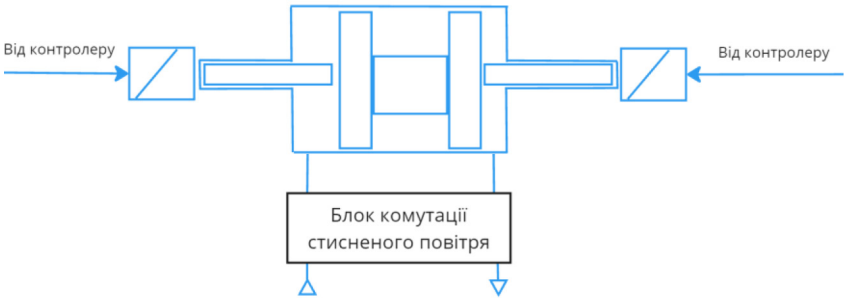


Рис. 2. Схема пневматичного розподільника з електричним керуванням

На схемі (рис. 3) зображено взаємодію між елементами пневматичної частини. Подача вхідного сигналу виконується елементом 1, сигнал прямує до елементу 2, цей елемент створює потік стисненого повітря, що проходить через елемент 3 та розподіляється між елементами 4 та 5ю В елементі 4 відбувається наповнення камери пневмоциліндру, а в елемені 5 перетворюється енергія стисненого повітря на механічну.

Далі, механічна енергія надходить до елементів 6, 8, 9, 10. В результаті відбувається переміщення рухомих мас (елемент 7), в'язке тертя реалізується елементом 11. За кінцеву позицію поршня відповідає елемент 12. Статичні опори – елементи 13 та 14. Механічна енергія перетворюється в пневматичну за допомогою елементу 9. Пневматична енергія надходить в елемент 15, та розподіляється між елементами 16 і 17. Спорожнення камери пневмоциліндру

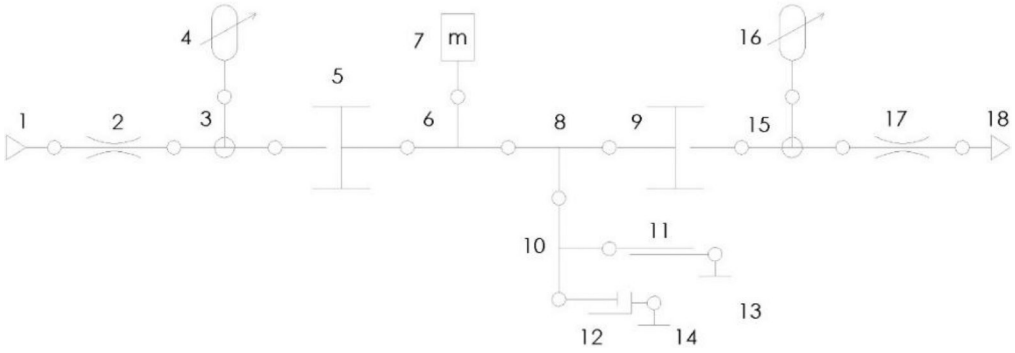


Рис. 3. Схема будови моделі пневматичного безштокового циліндру

реалізується елементом 16. Елемент 17 перетворює пневматичну енергі. Га потік стисненого повітря. За вихід енергії з системи відповідає елемент 18. Вихідні параметри: переміщення, швидкість, витрата, зусилля, що розвиває поршень.

Математична реалізація та взаємозв'язки між елементами зі схеми на рис.3 описуються у вигляді систем рівнянь (1.1) та (1.2).

$$\begin{cases} p_1 = p(t), \\ q_{3.1} = 0.0899 \cdot \mu \cdot f \cdot p_1 \cdot \sqrt{\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, \text{ при } \sigma = \dfrac{p_{2.2}}{p_1} < 1 \\ q_{3.1} = 0.02326 \cdot \mu \cdot f \cdot p_1, \text{ при } \sigma = \dfrac{p_{2.2}}{p_1} > 1 \\ q_{3.2} = q_{3.1} - q_{3.3}, \\ \dfrac{dp_{2.2}}{dt} = \dfrac{k \cdot R \cdot T_M \cdot q_{3.2} - k \cdot p \cdot (V_0 + \Delta V)}{V_0 + \Delta V}, \\ q_{3.3} = \dfrac{v}{S}, \\ q_{15.2} = q_{3.3} - q_{18} \\ \dfrac{dp_{16.2}}{dt} = \dfrac{k \cdot R \cdot T_M \cdot q_{15.2} - k \cdot p \cdot (V_0 + V_{\max} - \Delta V)}{V_0 + V_{\max} - \Delta V}, \\ q_{18} = 0.0899 \cdot \mu \cdot f \cdot p_{16.2} \cdot \sqrt{\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, \text{ при } \sigma = \dfrac{p_{18}}{p_{16.2}} < 1 \\ q_{18} = 0.02326 \cdot \mu \cdot f \cdot p_{16.2}, \text{ при } \sigma = \dfrac{p_{18}}{p_{16.2}} > 1 \\ p_{18} = p_a \end{cases} \tag{1.1}$$

$$\begin{cases} F_{6.1} = p_{2.2} \cdot S, \\ F_{6.2} = F_{6.1} - F_{6.3}, \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{F_{6.2}}{m}, \\ F_{6.3} = F_{8.2} + F_{8.3} \\ F_{8.2} = b \cdot v, \\ F_{8.3} = p_{15.1} \cdot S \\ v = 0, \ h = 0, \text{ при } h \geq h_{\max} \end{cases} \tag{1.2}$$

На основі систем рівнянь було створено математичну модель в середовищі Matlab Simulink. Система (рис. 4) складається с підсистем, що описують певне рівняння з систем (1.1) та (1.2). Для побудови логіки використовувався функціональний підхід [6].

Всі вхідні параметри розміщені в одному місці, зліва, що дозволяє легко змінювати необхідні значення, не шукаючи по всій моделі. Це значно підвищує читабельність моделі, так як вхідні параметри не займають зайвий простір і згруповані разом.

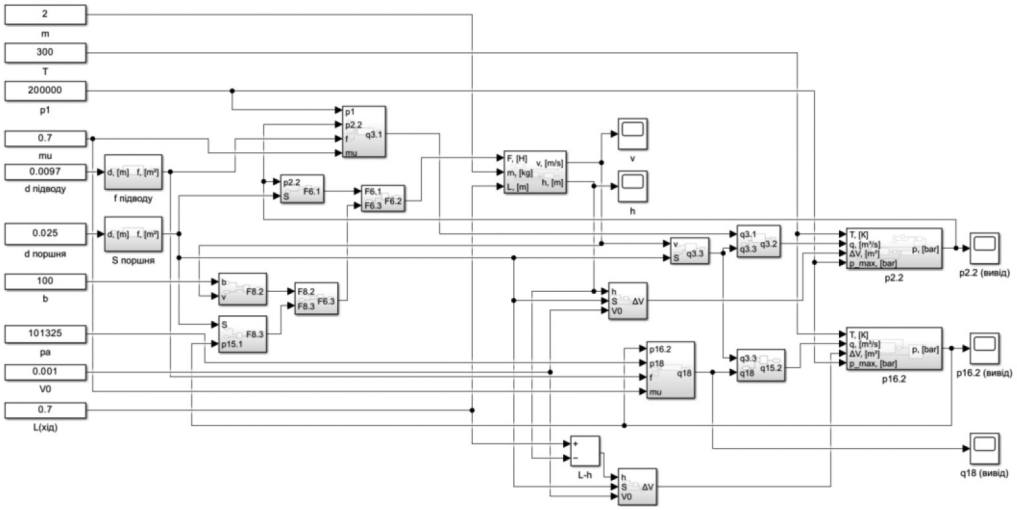


Рис. 4. Математична модель пневматичного безштокового циліндру в середовищі Matlab Simulink на основі функціонального підходу

Підсистеми мають відповідний до рівнянь інтерфейс, тобто вхідні та вихідні параметри підписані однаковими символами, не треба здогадуватись чи шукати по всій моделі, що конкретно за заначення передається в підсистему. Вся логіка інкапсульована в підсистеми, на верхньому рівні моделі лише вхідні параметри, інтерфейси підсистем та взаємозв'язки між ними.

Підсистеми в свою чергу складаються з інших підсистем, або Matlab functions, що було винесено в окрему бібліотеку для можливості подальшого використання в інших моделях та при необхідності швидкої зміни.

Даний підхід дозволяє перевикористовувати підсистеми з біліотеки, наприклад в системі пневматичного циліндру це використовується для використання однакових рівнянь, але з різними інтерфейсами, тобто підсистема обгортається в іншу підсистему з інтерфейсом, що відповідає конкретному випадку.

Також, треба сказати щодо інкапсуляції логіки в підсистемах, вся логіка що стосується обчислень чи логіка що перевіряє певні умови, або впроваджує обмеження, які напряму не прописані в рівняннях – скриваються всередині підсистем, а на верхньому рівні використовується лише інтерфейс, що являє собою вхідні та вихідні значення. Це дозволяє зробити модель декларативною та зменшити громіздкість. При необхідності вникнути в деталі реалізації певного блока, можна перейти в нього, замість того щоб розплутувати залежності на верхньому рівні.

Зважаючи на те, що це модель позиційного приводу, отже ключова його властивість – це зупинка в певному не кінцевому положенні, що і буде досліджуватися, для перевірки достовірності моделі. Позиція зупинки поршня має залежати від кількості поданого повітря, тобто від тривалості подачі вхідного сигналу та величини тиску.

Однак, позиційний привод складається не лише з циліндру, тож наступним кроком буде створення математичної моделі для двопозиційного пневматичного розподільнику з електромагнітним керуванням.

Поділимо математичну модель розподільника на 2 частини – пневматичну та електричну (рис. 5).

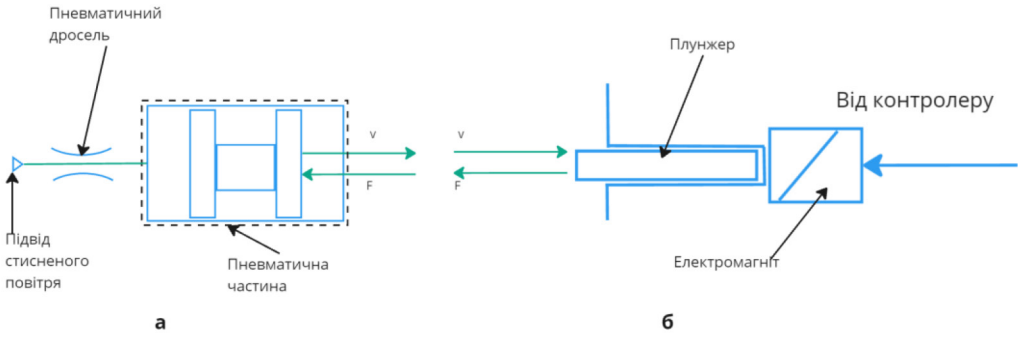


Рис. 5. Принципові схеми модулів пневматичного розподільника з електричним керуванням (а – модуль пневматичної частини; б – модуль електричної частини)

Зібравши стандартні елементи згідно з послідовністю виконання операцій у робочому процесі, була розроблена схема будови моделі (рис. 6), яка деталізує функціонування пневматичної частини позиційного приводу.

Вхідний сигнал надходить через елемент 1 блоку розподілу стиснутого повітря. Логічний елемент 2 виконує перемикання між надкритичним та підкритичним режимами. В елементах 3 і 4 формується потік стисненого повітря, який проходить через елементи 5 і 6 і надходить в елементи 7, де відбувається наповнення поршневої камери, а також елемент 8, що перетворює пневматичну енергію в механічну.

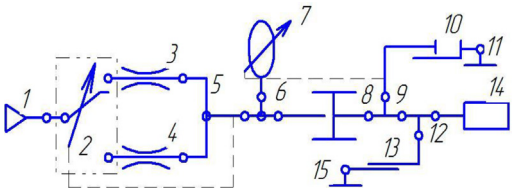


Рис. 6. Схема будови моделі пневматичної частини

Механічна енергія передається через елементи 9 і 12 для переміщення рухомих мас, через елемент 14 для подолання в'язкого тертя і елемент 13. Обмеження ходу контролюється логічним елементом 10. Елементи 11 і 15 служать статичними опорами. Вихідними параметрами є швидкість та зусилля, що розвиваються пневматичним поршнем. На основі схеми моделі були сформульовані системи рівнянь для пневматичної частини (1) та механічної частини (2).

$$\begin{cases} p_1 = p(t), \\ q_3 = 0.0899 \cdot \mu \cdot f \cdot p_1 \cdot \sqrt{\sigma^{\frac{2}{k}} - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, \\ q_4 = 0.02326 \cdot \mu \cdot f \cdot p_1, \\ q_{6.1} = q_3, \ \text{при } \sigma = \dfrac{p_2}{p_1} < 1 \\ q_{6.1} = q_4, \ \text{при } \sigma = \dfrac{p_2}{p_1} > 1 \\ q_{6.2} = q_{6.1} - q_{6.3}, \\ \dfrac{dp_2}{dt} = \dfrac{k \cdot R \cdot T_M \cdot q_{6.2} - k \cdot p \cdot \Delta V}{V_0 + \Delta V}, \\ q_{6.3} = \dfrac{v}{S}, \end{cases} \tag{2.1}$$

$$\begin{cases} F_{12.1} = p_2 \cdot S, \\ F_{12.2} = b \cdot v, \\ F_{12.3} = F_{12.1} - F_{12.2}, \\ \dfrac{dv}{dt} = \dfrac{F_{12.3}}{m}, \\ v = 0, \ h = 0, \ \text{при } h \geq h_{\max}. \end{cases} \tag{2.2}$$

На основі систем рівнянь (2.1) та (2.2) в середовищі Simulink побудовано математичну модель (рис. 7).

На основі принципової схеми електричної частини (рис. 8) було проведено аналіз робочого процесу, в ході якого виявлено набір стандартних елементів, що забезпечують його виконання. Поєднавши ці елементи відповідно до послідовності операцій робочого процесу, було складено схему структури моделі (рис. 9). Ця схема наочно демонструє функціонування електричної частини пристрою.

Вхідними сигналами є зусилля F і швидкість v, які передаються до пневматичного поршня через елемент 1.

Пневматична енергія розподіляється через елемент 9 для заповнення камери змінного об'єму, потім через елемент 10, що представляє електромагнітну котушку, елемент 11, який функціонує як контакт для підключення до реле.

$$\begin{cases} v = v(t), \\ F_{2.3} = F_{2.1} - F_{2.2}, \\ F_{5.3} = F_{2.3} - F_{5.2}, \\ F_{2.2} = b \cdot v, \\ F_{5.2} = k \cdot \Delta h, \\ F_{\Sigma} = F_{2.1} - F_{2.2} - F_{5.2}. \end{cases} \tag{3}$$

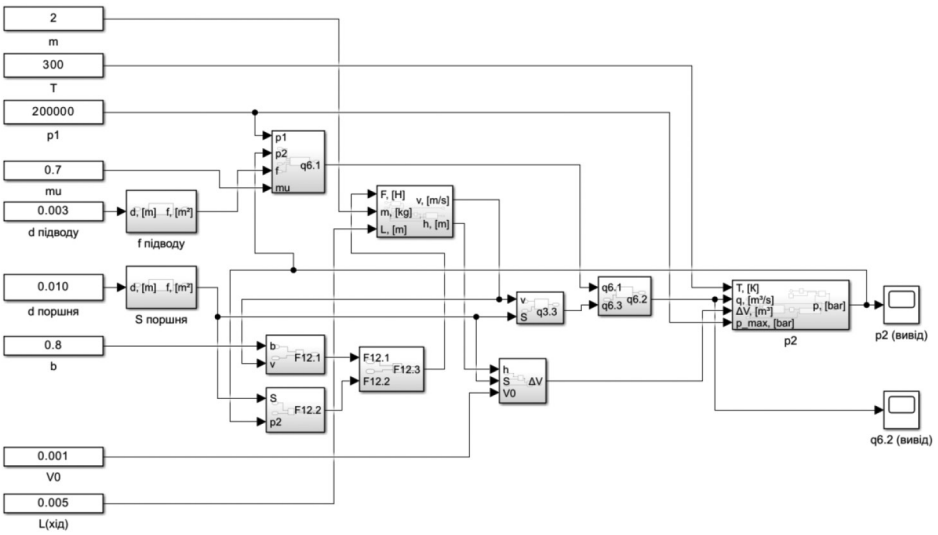


Рис. 7. Математична модель пневматичної частини розподільника в середовищі Simulink

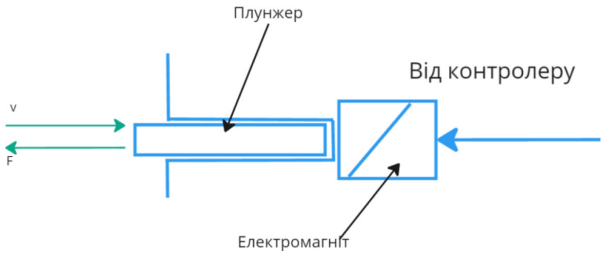


Рис. 8. Принципова схема модуля електричної частини розподільника

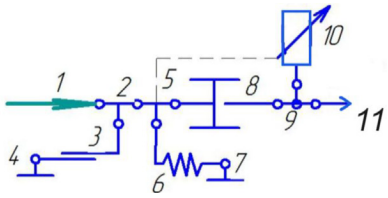


Рис. 9. Схема будови моделі електричної частини розподільника

На основі систем рівнянь (3) серед Simulink була побудована математична модель (рис. 10). Для передачі в модель використовуються входи 1–5. Обчислення виконуються згідно з рівняннями (3), і результуюча сила виводиться із системи через вихід 1.

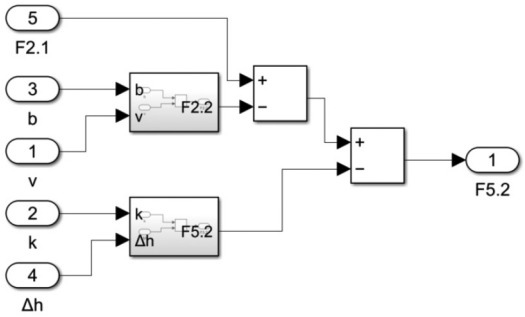


Рис. 10. Математична модель електричної частини розподільника в середовищі Simulink

Розроблені модулі математичної моделі, були протестовані на адекватність та правильність роботи. Перевірка показала, що модулі функціонують коректно і можуть бути використані для створення приводу позиційного на основі пневматичного розподільника.

Модель позиційного приводу, заснована на пневматичному розподільнику (рис. 11), поєднує моделі різних елементів приводу, які пов’язані між собою.

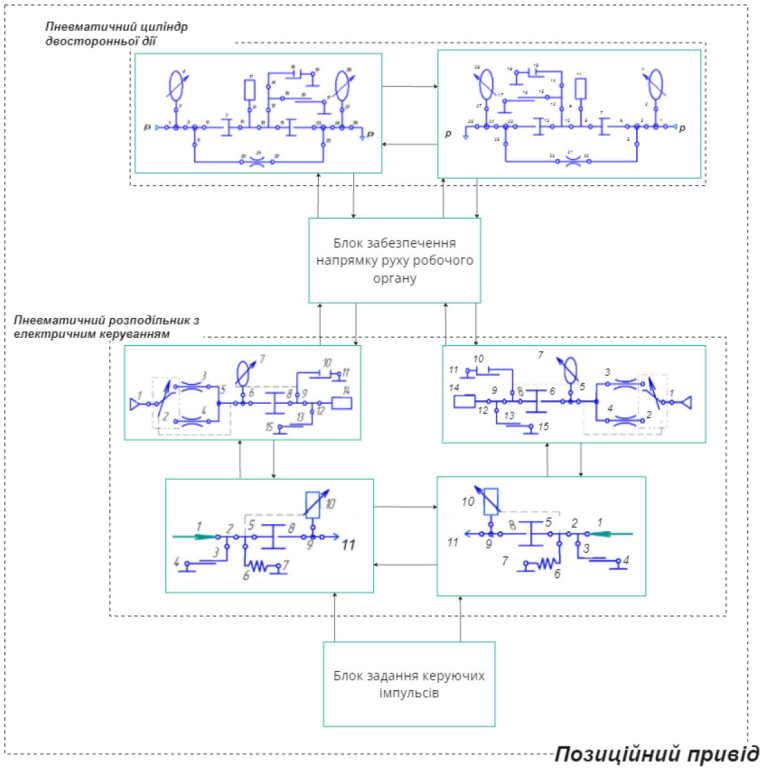


Рис. 11. Схема взаємодії модулів у моделі позиційного приводу на основі пневматичного розподільнику з електромагнітним керуванням

Для того, щоб переконатися в достовірності математичної моделі, було проведено перевірку наступним чином: змінювався час подачі стисненого повітря в камеру циліндру, тобто відбувалася зміна часу перемикання клапанів, при цьому спостерігалася зміна кінцевої позиції поршня.

Першим кроком було проведено ряд дослідів для зміни швидкості та переміщення в залежності від початкового тиску. Значення отримувалися за допомогою блоку scope з бібліотеки Simulink. Як результат, на кожній ітерації ми отримували графіки для залежності переміщення від часу, та швидкості від часу (рис. 12).

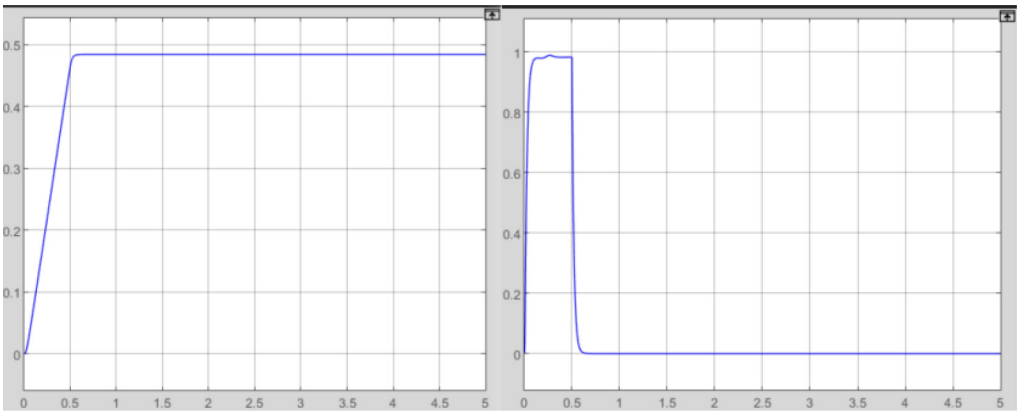


Рис. 12. Графіки отримані з симуляції Simulink: а – залежність переміщення від часу; б – залежність швидкості від часу

В результаті було проведено 15 дослідів з різними значеннями тисків та часом переключення розподільника (Таблиця 1).

На основі даних з симуляцій, побудовано графік залежності переміщення поршня від часу перемикання розподільника. Симуляція проводилась для циліндру діаметром поршня 25 мм, хід 700 мм.

Таблиця 1

Експериментальні дані симуляції

Час переключення розподільника, мс	Переміщення поршня, м		
	4 бар	3 бар	2 бар
100	0,12	0,09	0,06
200	0,26	0,18	0,13
300	0,37	0,27	0,19
400	0,52	0,37	0,26
500	0,64	0,48	0,32

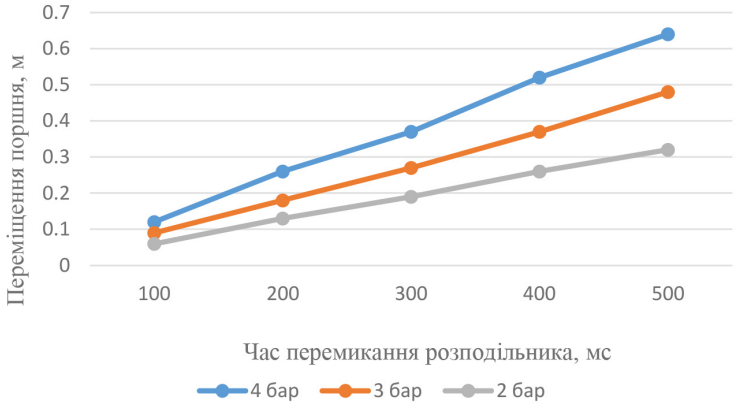


Рис. 13. Залежність переміщення поршня від часу перемикання розподільника

З графіка на рис. 13 видно, що переміщення поршня збільшується при збільшенні часу перемикання розподільника. При чому, чи більше значення тиску, тим більше значення переміщення поршня. Також, важливим є те, що поршень зупиняється в різних, не кінцевих позиціях.

Наступник кроком, проведено ряд симуляцій для виявлення точності позиціонування при різних діаметрах (рис. 14). В симуляції використовувався вхідний тиск в 0,3 МПа, імпульси тривалістю 0,1 с.

З аналізу даних видно, що зі збільшенням діаметра циліндра крок об'єму також збільшується. Для діаметра 16 мм крок становить 0,04 м, для 25 мм – 0,1 м, а для 32 мм – 0,15 м. Це свідчить про пряму залежність між діаметром і розміром кроку. Причина цього полягає в тому, що зі збільшенням діаметра збільшується сила, що діє на поршень, що дозволяє йому подолати більшу відстань за один цикл.

Також помітно, що час зупинки збільшується зі збільшенням діаметра. Це можна пояснити тим, що більший об'єм повітря потребує більше часу для заповнення або випуску, що сповільнює процес зупинки. Оскільки час перемикання залишається однаковим для всіх випадків, різниця в часі зупинки ще наочніше демонструє вплив діаметра на динаміку руху.

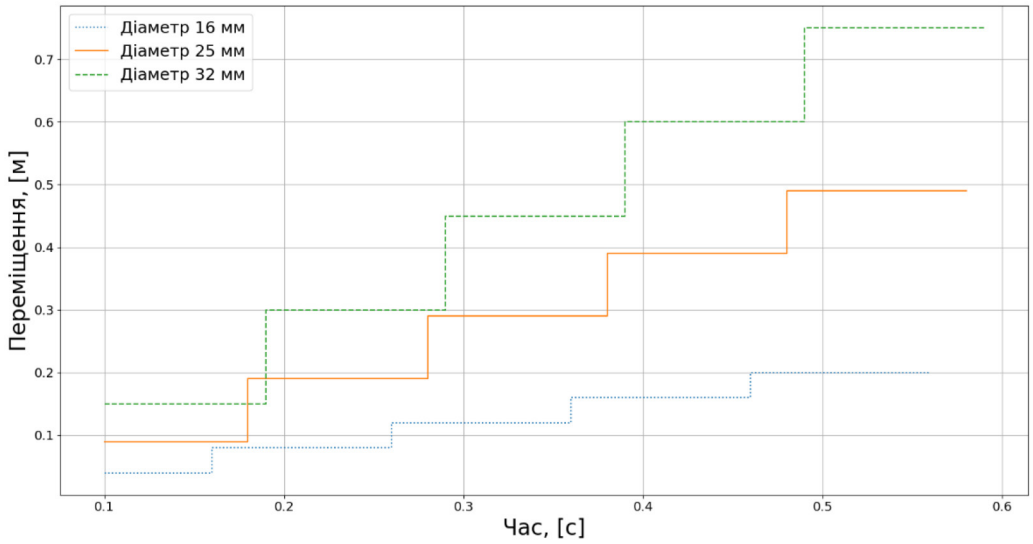


Рис. 14. Позиціонування штоку пневматичного циліндру при діаметрах 16, 25 та 32 мм

Таким чином, якщо потрібна більша точність позиціонування, доцільно використовувати менший діаметр, так як крок буде менше. Однак, якщо важлива швидкість пересування на великі відстані, ефективніше використовувати циліндри більшого діаметру, при цьому жертвуючи точністю позиціонування.

Висновки

Розроблено математичну модель пневматичного позиційного приводу та реалізовано в середовищі MATLAB Simulink. Для перевірки моделі на адекватність було проведено ряд симуляцій для перевірки залежності переміщення поршня від часу перемикання розподільника та позиціонування штоку при різних діаметрах.

На основі результатів симуляцій, можна зробити висновок, що переміщення поршня збільшується при збільшенні часу перемикання розподільника та/або тиску. Також, щодо позиціонування, крок та час зупинки збільшується при збільшенні діаметру штока.

Отже, можна зробити висновок, що модель працює адекватно, тож її можна використовувати для проведення модельних досліджень.

Список використаної літератури

1. Rivin D.E. Design of precision pneumatic drives // Precision Engineering. 1995. Vol. 17, No. 1. P. 25–34. [in English].

2. Al-Mahmoud A., Zaier A. Pneumatic bellows actuated parallel platform control with adjustable stiffness using a hybrid feed-forward and variable gain I-controller // arXiv preprint. 2023. arXiv:2306.10832. [in English].

3. Turchetti M.M. et al. Learning-based position and stiffness feedforward control of antagonistic soft pneumatic actuators using Gaussian processes // arXiv preprint. 2023. arXiv:2303.01840. [in English]

4. Jiang Z., Xiong W., Du H., Wang Z., Wang L. Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air // Journal of Engineering. 2021. No. 2021. P. 241–251. DOI: https://doi.org/10.1049/tje2.12000. [in English].

5. Aly A.A., Abo El-Lail A.S., Shoush K.A., Salem F.A. Intelligent PI Fuzzy Control of An Electro-Hydraulic Manipulator // International Journal of Intelligent Systems and Applications. 2012. No. 7. P. 43–49. [in English].

6. Płachta M. Grokking Functional Programming. New York : Manning Publications, 2020. URL: https://www.manning.com/books/grokking-functional-programming. [in English].

References

1. Rivin, D.E. (1995). Design of precision pneumatic drives. Precision Engineering, 17(1), 25–34.

2. Al-Mahmoud, A., & Zaier, A. (2023). Pneumatic bellows actuated parallel platform control with adjustable stiffness using a hybrid feed-forward and variable gain I-controller. arXiv preprint arXiv:2306.10832.

3. Turchetti, M.M., et al. (2023). Learning-based position and stiffness feedforward control of antagonistic soft pneumatic actuators using Gaussian processes. arXiv preprint arXiv:2303.01840.

4. Jiang, Z., Xiong, W., Du, H., Wang, Z., & Wang, L. (2021). Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air. Journal of Engineering, 2021, 241–251. https://doi.org/10.1049/tje2.12000

5. Aly, A.A., Abo El-Lail, A.S., Shoush, K.A., & Salem, F.A. (2012). Intelligent PI fuzzy control of an electro-hydraulic manipulator. International Journal of Intelligent Systems and Applications, 7, 43–49.

6. Płachta, M. (2020). Grokking functional programming. Manning Publications.

УДК 667.021.1 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.11

О. І. КЛЮЄВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-6803-0706

І. А. ШАТОХІНА
старший викладач кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-5767-3674

С. А. РУСАНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1003-4867

КОНСТРУКТИВНА РЕАЛІЗАЦІЯ СТЕНДІВ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРІВ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДУ ДЛЯ ПЕРЕДПУСКОВОЇ ПІДГОТОВКИ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ АВТОМОБІЛІВ

У даному дослідженні розглядаються конструктивні особливості стендів для випробування теплоакумуляційної техніки, що використовується для поліпшення пуску двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) на автомобільному транспорті. Пускові характеристики двигунів, зокрема в умовах низьких температур, значно впливають на ефективність роботи автомобіля, економічність його експлуатації, а також на зниження шкідливих викидів. Одним із можливих способів покращення пускових характеристик є використання теплоакумуляторів, які забезпечують попередній підігрів охолоджувальної рідини та інших компонентів двигуна, що значно знижує негативний вплив низьких температур на його роботу.

Для оцінки ефективності таких технологій та вивчення їх впливу на технічні параметри автомобіля необхідно використовувати спеціалізовані стенди, які дозволяють моделювати різноманітні умови експлуатації та проводити випробування в контрольованому середовищі. Одним з основних завдань є розробка конструкцій стендів, що забезпечують не тільки точність і надійність вимірювань, а також адаптовані для різних типів теплоакумуляторів і ДВЗ. Важливим аспектом є створення умов, які максимально наближаються до реальних, для коректного визначення впливу теплоакумуляційних систем на роботу двигуна під час пуску. Випробування повинні проводитися за участю різних типів охолоджувальних рідин, що використовується в системах автомобільних ДВЗ, що дозволить визначити оптимальні умови для роботи як самих двигунів, так і для теплоакумуляційних систем, зокрема на різних етапах нагріву.

Вивчення конструктивних особливостей стендів для випробування теплоакумуляційних систем дозволяє розробити більш ефективні методи пуску двигунів, що позитивно впливають на зниження витрат пального, зменшення шкідливих викидів, а також підвищення енергоефективності і економічності використання автомобільного транспорту.

Ключові слова: *теплоакумулятор, двигун внутрішнього згоряння, теплообмінник, автомобільний транспорт.*

O. I. KLIUIEV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-6803-0706

I. A. SHATOKHINA
Senior Lecturer at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-5767-3674

S. A. RUSANOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1003-4867

DESIGN IMPLEMENTATION OF TEST STANDS FOR PHASE CHANGE THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR PRE-START PREPARATION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES IN AUTOMOBILES

This study examines the design features of test stands for evaluating thermal energy storage systems used to improve the starting performance of internal combustion engines (ICEs) in automotive transport. The starting characteristics of engines, especially in low-temperature conditions, significantly affect the vehicle's operational efficiency, fuel economy, and reduction of harmful emissions. One potential way to improve starting performance is by using thermal energy storage devices that provide preheating of the coolant and other engine components, which greatly reduces the negative impact of low temperatures on engine operation.

To assess the effectiveness of such technologies and study their impact on the vehicle's technical parameters, specialized test stands are required to model various operating conditions and conduct tests in a controlled environment. One of the main tasks is to develop stand designs that ensure not only measurement accuracy and reliability but are also adaptable to different types of thermal energy storage systems and internal combustion engines. An important aspect is the creation of conditions that closely mimic real-life situations to accurately determine the impact of thermal storage systems on engine performance during startup. Testing should involve different types of coolants used in automotive engine systems, which will allow for the identification of optimal conditions for both the engines themselves and the thermal energy storage systems, particularly during various heating stages.

Studying the design features of test stands for evaluating thermal energy storage systems enables the development of more efficient engine starting methods, which positively affect fuel consumption reduction, harmful emission reduction, and increase the energy efficiency and economic viability of automotive transport usage.

Key words: *heat accumulator, internal combustion engine, heat exchanger, road transport.*

Постановка проблеми

Збереження та підтримка оптимальної температури роботи двигуна внутрішнього згоряння є важливою задачею з технічної та економічної точки зору. Одним із перспективних напрямків є використання методу акумулювання теплоти, що утворюється під час роботи двигуна (паразитне тепло), для подальшого застосування при передпусковому підігріві. Збільшення вимог до зменшення витрат пального, енергоспоживання та викидів сприяє розробці нових технологій енергозбереження. Теплові акумулятори (ТА), які здатні накопичувати та ефективно використовувати теплоту, можуть значно покращити енергоефективність автомобільних систем, зокрема за умов зміни температури навколишнього середовища. В умовах низьких температур вони допомагають зменшити витрати пального, а також підвищують комфорт водія і пасажирів, скорочуючи час, необхідний для прогріву двигуна і салону автомобіля. Різноманітні конструктивні виконання ТА потребують проведення додаткових натурних стендових випробувань їх ефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Один із найбільш простих методів накопичення теплоти полягає в застосуванні ємнісних акумуляторів з охолоджуючою рідиною, яка ізольована від зовнішнього теплообміну та основної системи охолодження. Наприклад, під час розрядки теплоакумулятора гаряча і холодна рідини знаходяться в одній вертикальній ємності, де охолоджена рідина витісняє нагріту. Для забезпечення ефективного розподілу та руху рідини використовуються різні пристрої, турбулізатори та інші технології для поліпшення теплообміну. Такий тип теплоакумуляторів тим не менш має лімітовану невеликими значеннями питому ємність, що, у свою чергу, приводить до більших габаритів. Це обмежує можливість використання таких систем у сучасних автомобілях, де простір під капотом сильно обмежений через щільне розташування компонентів та агрегатів. Розміщення теплоакумулятора в салоні або багажному відділенні також призводить до зменшення корисного об'єму, що погіршує споживчі характеристики і знижує ринкову привабливість пристрою. Окрім того, це ускладнює процес монтажу і сприяє збільшенню теплових втрат. Одним з найефективніших практичних рішень є використання теплоакумуляторів, робота яких базується на фазовому переході «тверде – рідина» [1, 2]. В таких системах, окрім теплоти, яка виділяється під час фазового переходу, також використовується теплота нагрівання як твердого, так і рідкого стану [1–7]. Перевагою таких конструкцій є висока питома теплоємність, що дозволяє зробити їх компактними. Крім того, стабільність температури під час розрядки теплоакумулятора забезпечує більшу ефективність у порівнянні з системами, де температура теплоносія знижується поступово.

Згідно з аналізом літератури [6, 7, 8], для автомобільної техніки найбільш ефективними є конструкції теплоакумуляторів, що складаються з корпусу з подвійними стінками для забезпечення теплоізоляції. Внутрішній об'єм

такого корпусу заповнений фазоперехідним матеріалом, який здатен накопичувати тепло, а всередині розташовані трубки, через які циркулює теплоносій. Як теплоносій пропонується використовувати відпрацьовані гази автомобільного двигуна. Однак, необхідно зазначити, що ці гази мають температуру в межах 600–700 °С, що може призвести до термічного пошкодження теплоакумулюючого матеріалу та металевих частин конструкції. Крім того, це може спричинити перегрівання охолоджувальної рідини двигуна, що може призвести до його поломки.

Формулювання мети дослідження

При проєктуванні та виборі компоновки теплового акумулятора треба враховувати, що конструкція ТА для передпускової підготовки двигуна автомобіля повинна відповідати певним вимогам [9–11]:

– час розрядження ТА якнайбільший, щоб при стоянці автомобіля при низьких температурах оточуючого повітря не відбулось значного охолодження двигуна;

– габарити якнайменші, оскільки простір для розміщення ТА в автомобілях обмежений;

– об'єм охолоджуючої двигун рідини в ТА якнайменший, щоб не збільшувати загальний об'єм цієї рідини в системі охолодження двигуна.

Ефективність роботи ТА визначається тривалістю підтримання достатньої для запуску двигуна температури. Якщо вона зберігається при стоянці на достатньому рівні, то запуск двигуна можливий без тривалого прогрівання двигуна і використання додаткових нагрівачів, як, наприклад, ТЕНів.

У зв'язку з різноманітністю конструкцій теплоакумуляторів фазового переходу для автомобільної техніки (на рис. 1 показано в якості прикладу ТА фазового переходу з U-подібними трубками), проведення стендових досліджень є необхідним етапом для оцінки їх ефективності та безпечності. Кожен варіант конструкції може мати свої особливості, які впливають на працездатність системи в умовах реального використання. Стендові випробування мають дозволити точно визначити характеристики теплоакумуляторів, такі як швидкість накопичення та віддачі тепла, термічну стабільність, здатність витримувати високі температури, а також їх ефективність у різних температурних режимах. Дослідження на стендах також допомагають виявити супутні параметри, наприклад, пов'язані з термічною деформацією матеріалів, перегрівом системи чи нестабільною роботою теплоносія.

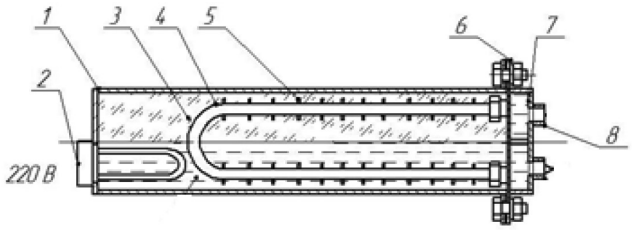


Рис. 1. Тепловий акумулятор: *1* **– корпус;** *2* **– електронагрівач;** *3* **– теплоакумулюючий матеріал;** *4* **– U-подібний рідинний теплообмінник заряду-розряду;** *5* **– оребрення;** *6* **– трубна решітка;** *7* **– колекторна камера;** *8*, *10* **– патрубок**

Таким чином складається ситуація, коли для різних компоновок ТА, зокрема, для різних ТАМ, може бути потреба в різних підходах до стендових випробувань. Деякі особливості системи «стенд – компоновка ТА» ми висвітлюємо у цій публікації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Випробування можуть бути проведено на стендах, що контролюють вхідні-вихідні температурні параметри без примусової циркуляції (за один цикл нагрівання), з примусовою циркуляцією, та в реальних умовах системи «ТА – ДВЗ».

Загальна схема стенду без примусової циркуляції показана на рис. 2. Нагрівання теплоакумулятора здійснюється за допомогою електронагрівача *5*. Випробування проводяться тільки після того, як теплоакумулююча речовина досягне заданої температури, яка перевищує температуру фазового переходу, але залишається нижчою за температуру кипіння охолоджуючої рідини. Холодна рідина зберігається в резервуарі *1*, і після відкриття крана *2* вона надходить через трубопровід *3*, який з'єднує резервуар з теплоакумулятором. Після цього рідина проходить через теплоакумулятор *4*, трубопровід *6* з датчиками температури t_2 і t_3, і потрапляє в резервуар для прогрітої речовини *7*.

Треба мати на увазі, що теплова ємність теплового акумулятора на основі фазового переходу залежить не тільки від зміни температури, але й від теплоти фазового переходу, що може бути записано у вигляді

$$H = c_{тв}(T_ф - T_1) + \Delta h_ф + c_р(T_2 - T_ф), \quad (1)$$

де $c_{тв}$ – питома теплоємність твердої фази; $\Delta h_ф$ – ентальпія фазового переходу; $c_р$ – питома теплоємність рідкої фази.

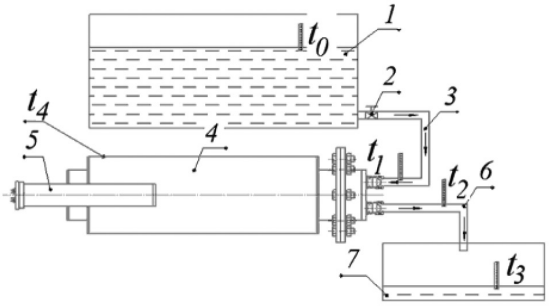


Рис. 2. Схема одноциклового стенду ТА. *1* **– резервуар з холодною рідиною,** *2* **– кран,** *3*, *6* **– трубопроводи,** *4* **– теплоакумулятор,** *5* **– електронагрівач,** *7* **– резервуар з нагрітою рідиною**

У більшості випадків на автомобільному транспорті застосовуються системи з ТАМ з переходом тверде-рідина, які забезпечують більш ефективне накопичення теплоти при компактних розмірах. Серед матеріалів, що забезпечують вищевказану умову щодо температури фазового переходу меншої за температуру кипіння охолоджуючої рідини, можна виділити парафіни, октогідрати солей, карбонат натрію, воски, озокерит та інші. У дослідженнях, що проводилися на кафедрі транспортних систем і технічного сервісу Херсонського національного технічного університету, використовувалися октогідрати солей барію, парафіни, озокерит [12].

Октогідрати показали достатній тепловміст, але ж разом з тим високу корозійну активність, що обмежило їх подальше використання. Озокерит являє собою природний вуглеводень з групи нафти, є сумішшю високомолекулярних насичених вуглеводнів. Його перевагами є дешевизна, низка корозійна активність, відсутність негативного впливу на оточуюче середовище. Парафіни мають питому теплоту плавлення від 50 до 180 кДж/кг і при цьому демонструють високу стійкість до термоциклювання, залишаючись хімічно інертними. Завдяки своїй хімічній інертності, з парафінами у процесі роботи теплоакумулятора не відбуваються хімічні реакції, що забезпечує стабільність властивостей системи протягом тривалого часу. Складності при проєктуванні теплоакумуляторів з фазовим переходом на основі парафінів у першу чергу пов'язані з їхнім низьким коефіцієнтом теплопровідності (близько 0,12–0,17 Вт/(м^2 · К)), що потребує змін у конструкції теплообмінників. Для покращення теплообміну між теплоакумулюючим матеріалом та теплоносієм необхідно збільшити площу поверхні контакту та передбачити додаткові заходи щодо оптимізації теплообміну. Крім того, зміна густини при фазовому переході (плавленні) ускладнює конструкцію теплоакумуляторів, оскільки вимагає застосування технічних рішень для компенсації зміни об'єму. До таких рішень можна віднести створення вільних порожнин всередині капсул, а також використання корпусів, що спрямовано деформуються (з компенсаторами). Це ускладнює процес виробництва, що, своєю чергою, збільшує вартість конструкції. Для автомобільних теплоакумуляторів оптимальним рішенням є розміщення теплоакумулюючого матеріалу в окремих капсулах або міжтрубному просторі.

Стенд з примусовою циркуляцією та капсульним ТА показано на рис. 3.

Стендові випробування проводяться таким чином. Нагрівання теплоакумулятора здійснюється за рахунок електронагрівача *9* потужністю 1,5 кВт. Через ТА насосом *11* прокачується охолоджуюча двигун рідина (ОДР) до досягнення температур ОДР і ТАМ 85 °С. Потім нагрівання припиняється і ТА охолоджується. При цьому проводиться вимір температур у часі, та будується крива охолодження ТАМ, а разом з ним і ОДР.

Крива охолодження (розрядження ТА) (рис. 4) має три ділянки: охолодження ТАМ і ОДР до температури кристалізації ТАМ (I етап); перебування ТАМ і ОДР при температурі, близькій до температури кристалізації ТАМ (II етап); охолодження ОДР і ТАМ до температури оточуючого середовища (III етап).

На рис. 5 схематично зображено експериментальну установку системи «ТА – ДВЗ», яка складається із змійовикового теплоакумулятора і двигуна внутрішнього згорання. Теплоакумулятор складається з герметичного корпусу *1*, у якому розміщений змієвиковий рідинний теплообмінник заряду-розряду *5*. Внутрішня порожнина корпусу заповнена фазоперехідним теплоакумулюючим матеріалом парафіном *2*, а також рідиною *3*. Трубні решітки *6*, *7* призначені для закріплення змійовика та введення охолоджуючої двигун рідини у тепловий акумулятор. Для введення охолоджуючої рідини в теплоакумулятор використовують електромагнітні клапани заряду-розряду *8*, *9*, *11* і насос *10*. Термоізоляція використовується для збереження тепла в теплоакумуляторі. Схема роботи теплоакумулятора в системі стенда наступна.

Вмикається ТЕН *4*, який нагріває рідину *3* до 70 °С. Цього достатньо, щоб розплавити фазоперехідний теплоакумулюючий матеріал *2*. Відкривається електромагнітний клапан *8*, *11* і охолоджуюча рідина за допомогою насоса *10* починає рухатися з двигуна внутрішнього згорання через змієвиковий рідинний теплообмінник заряду-розряду і повертається по колу в ДВЗ. Регулювання витрати рідини робиться за допомогою крану *14*. За допомогою виміру температур оцінюємо ефективність теплоакумулятора.

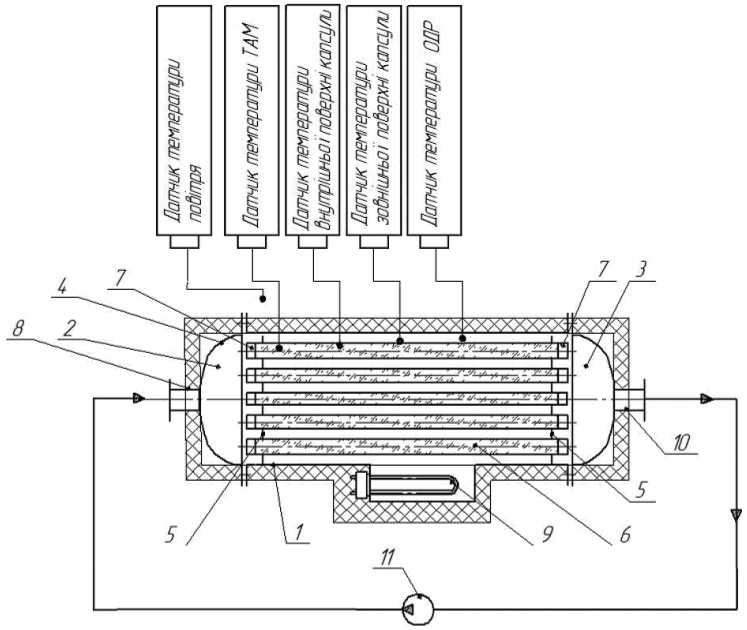


Рис. 3. Схема стенду для випробування ТА: *1* **– корпус;** *2*, *3* **– вхідна і вихідна колекторні камери;** *4* **– кришки;** *5* **– решітка для утримування капсул;** *6* **– капсули з ТАМ;** *7* **– фітинги;** *8*, *10* **– вхідний і вихідний штуцери;** *9* **– трубчастий електронагрівач (ТЕН);** *11* **– насос. Точками відмічені місця виміру температур**

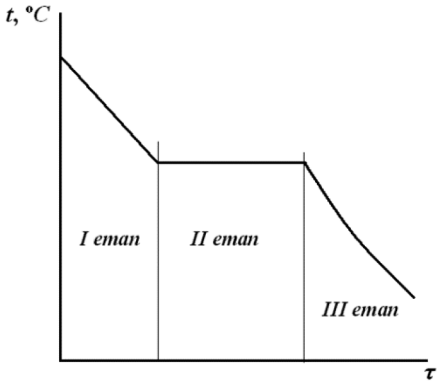


Рис. 4. Етапи охолодження теплового акумулятора

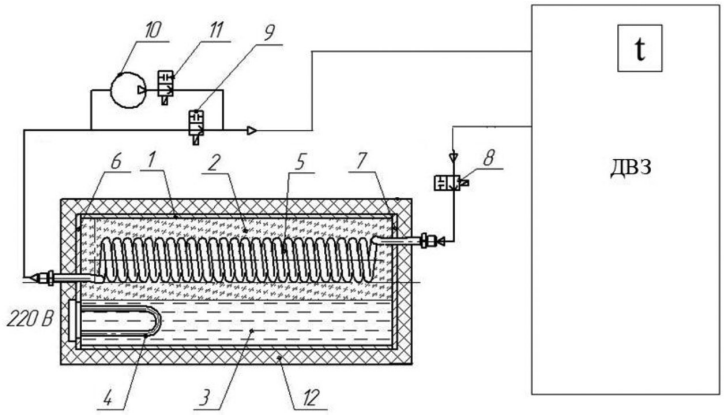


Рис 5. Схема стенда «ТА – ДВЗ» *1* **– теплоакумулятор;** *2* **– теплоакумулюючий матеріал;** *3* **– рідина;** *4* **– ТЕН;** *5* **– змієвиковий рідинний теплообмінник заряду-розряду;** *6*, *7* **– трубні решітки;** *8*, *9*, *11* **– електромагнітні клапани;** *10* **– насос;** *11* **– охолоджуюча рідина;** *12* **– термоізоляція**

Висновки

За результатами досліджень запропоновано низку конструкторських рішень для стендів з випробування теплоакумуляційної техніки з теплоакумулюючим матеріалом фазового переходу. Запропоновано класифікацію стендів, що контролюють вхідні-вихідні температурні параметри: без примусової циркуляції (за один цикл нагрівання), з примусовою циркуляцією, та в реальних умовах системи «ТА – ДВЗ».

Вказані схеми відповідних конструктивних виконань стендів з прикладами виконань тепло акумуляторів у вигляді теплообмінника з U-образними трубками, змійовикового теплообмінника (в яких, на відміну від попередніх конструктивних рішень, фазоперехідний теплоакумулюючий матеріал і теплоносій знаходяться в одному просторі герметичного корпусу, що забезпечує підвищення теплопередачі безпосередньо і спрощення конструкції теплоакумулятора) та капсульного теплообмінника.

Список використаної літератури

1. Wang G., Dannemand M., Chao Xu, Englmair G., Furbo S., Fan J. (2021) Thermal characteristics of a long-term heat storage unit with sodium acetate trihydrate. Applied Thermal Engineering. 187. P. 133–147. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116563

2. Solomon L, Zheng Y, Tuzla K, Neti S, Oztekin A. (2018) Analysis of an encapsulated phase change material based energy storage system for high temperature applications. International Journal of Energy Research. 42 (7). P. 2518–2535.

3. Kenisarin M, Mahkamov K. (2016) Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. Renew Sustain Energy Rev. 55. P. 371–398. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.128

4. Sarbu I, Dorca A. (2019) Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. Int J Energy Res. 43. P. 29–64. DOI: https://doi.org/10.1002/er.4196

5. Zhang H, Baeyens J, Caceres G, 5. Degreve J, Lv Y. (2016) Thermal energy storage: recent developments and practical aspects. Progress in Energy and Combustion Science. 53. P. 1–40. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.003

6. Wang M. Integration and Validation of a Thermal Energy Storage System for Electric Vehicle Cabin Heating / Mingyu Wang, Timothy Craig, and Edward Wolfe //Journal Volume, Detroit, Michigan, United States of America, Conference. 2017. P. 2–8. DOI: https://doi.org/10.4271/2017-01-0183

7. Belik S. (2017) Thermal Energy Storage Systems: Power-to-Heat Concepts in Solid Media Storage for High Storage Densities / Sergej Belik, Volker Dreißigacker, Mila Dieterich and Werner Kraft //Journal of Traffic and Transportation Engineering. 5. P. 285–294. DOI: https://doi.org/10.17265/2328-2142/2017.06.001

8. Клюєв О.І., Русанов С.А., Аппазов Е.С., Луняка К.В., Коновалов Д.В., Мацків Б.М. Тепловий акумулятор системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згорання. Патент на корисну модель № 137780 від 11.11.2019. Бюл. № 21.

9. Pyhtya V.A. (2010) Experimental studies of the engine preheating system with a thermal battery, Visnyk SNU im. Volodymyra Dalia [Bulletin of the Volodymyr Dahl SNU], № 6(148). P. 246–251.

10. Аппазов Е.С. Моделювання гідродинамічних та теплових процесів при передпусковій підготовці автомобільних двигунів / Е.С. Аппазов, О.І. Клюєв, С.А. Русанов // Науковий вісник Херсонської державної морської академії: науковий журнал. – Херсон : Вид-во ХДМА, 2014. № 1(10). С. 131–136.

11. Дмитрієв Д.О., Аппазов Е.С., Русанов С.А., Клюєв О.І. Моделювання процесу розігріву двигуна з тепловим акумулятором при передпусковій підготовці // Вісник Хмельницького національного університету, № 5, 2015, С. 54–58.

12. Луняка К.В., Клюєв О.І., Русанов С.А., Клюєва О.О. Дослідження роботи теплового акумулятора системи передпускового прогріву двигуна внутрішнього згоряння. Теплофізика та теплоенергетика. 2020 т. 42, № 3. С. 76–81.

References

1. Wang G., Dannemand M., Chao Xu, Englmair G., Furbo S., Fan J. (2021) Thermal characteristics of a long-term heat storage unit with sodium acetate trihydrate. Applied Thermal Engineering. 187. P. 133–147. DOI: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.116563

2. Solomon L, Zheng Y, Tuzla K, Neti S, Oztekin A. (2018) Analysis of an encapsulated phase change material based energy storage system for high temperature applications. International Journal of Energy Research. 42 (7). P. 2518–2535.

3. Kenisarin M, Mahkamov K. (2016) Passive thermal control in residential buildings using phase change materials. Renew Sustain Energy Rev. 55. P. 371–398. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.128

4. Sarbu I, Dorca A. (2019) Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. Int J. Energy Res. 43. P. 29–64. DOI: https://doi.org/10.1002/er.4196

5. Zhang H, Baeyens J, Caceres G, 5. Degreve J, Lv Y. (2016) Thermal energy storage: recent developments and practical aspects. Progress in Energy and Combustion Science. 53. P. 1–40. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pecs.2015.10.003

6. Wang M. Integration and Validation of a Thermal Energy Storage System for Electric Vehicle Cabin Heating / Mingyu Wang, Timothy Craig, and Edward Wolfe //Journal Volume, Detroit, Michigan, United States of America, Conference. 2017. P. 2–8. DOI: https://doi.org/10.4271/2017-01-0183

7. Belik S. (2017) Thermal Energy Storage Systems: Power-to-Heat Concepts in Solid Media Storage for High Storage Densities / Sergej Belik, Volker Dreißigacker, Mila Dieterich and Werner Kraft //Journal of Traffic and Transportation Engineering. 5. P. 285–294. DOI: https://doi.org/10.17265/2328-2142/2017.06.001

8. Kliuiev O.I., Rusanov S.A., Appazov E.S., Luniaka K.V., Konovalov D.V., Matskiv B.M. (2019) Teplovyi akumuliator systemy peredpuskovoho prohrivu dvyhuna vnutrishnoho zghorannia. Patent na korysnu model № 137780 vid 11.11.2019. Biul. № 21.

9. Pyhtya V.A. (2010) Experimental studies of the engine preheating system with a thermal battery, Visnyk SNU im. Volodymyra Dalia [Bulletin of the Volodymyr Dahl SNU], № 6(148). P. 246–251.

10. Appazov E.S. (2014). Modeliuvannia hidrodynamichnykh ta teplovykh protsesiv pry peredpuskovii pidhotovtsi avtomobilnykh dvyhuniv / E.S.Appazov, O.I.Kliuiev, S.A.Rusanov//Naukovyi visnyk Khersonskoi derzhavnoi morskoi akademii: naukovyi zhurnal. – Kherson : Vyd-vo KhDMA, № 1(10). S. 131–136.

11. Dmytriiev D.O., Appazov E.S., Rusanov S.A., Kliuiev O.I. (2015) Modeliuvannia protsesu rozihrivu dvyhuna z teplovym akumuliatorom pry peredpuskovii pidhotovtsi // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, № 5, S. 54–58.

12. Lunyaka K.V., Klyuev O.I., Rusanov S.A., Klyueva O.O. (2020) Doslidzhennya roboty teplovogo akumulyatora systemy peredpuskovoho prohrivu dyvuhuna vnutrishnoho zhorinannya. Teplofyzyka ta teploenerhetyka. t. 42, № 3. S. 76–81.

УДК 621.039.4 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.12

Є. В. КОНОПЛЯНЧЕНКО
кандидат технічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-4814-1796

Н. В. ТАРЕЛЬНИК
кандидат економічних наук, доцент
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6304-6925

РОЗРОБКА СИСТЕМИ СПРЯМОВАНОГО ВИБОРУ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЯГНЕННЯ НЕОБХІДНОЇ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ДЕТАЛЕЙ НАСОСНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС ПРИ ЇХ ВИГОТОВЛЕННІ ТА РЕМОНТІ

В представленій статті відмічена актуальність ефективного функціонування та технічного обслуговування насосного обладнання (НО) для забезпечення безпеки та стабільності атомних електростанцій (АЕС) Це є важливим не тільки для підтримки матеріального стану станції, але й впливає на загальну безпеку, а також на підвищення ефективності експлуатації та зниження витрат на експлуатацію. В аналізі існуючих робіт в цьому напрямку показано, що система спрямованого вибору технології досягнення потрібної якості поверхні деталей насосного обладнання на АЕС, включає в себе всі етапи їх життєвого циклу починаючи з її конструкції і закінчуючи її утилізацією. При цьому на кожному етапі існує низка спеціальних методів спрямованого вибору, які враховують купу їх необхідних характеристик (надійність, вартість, технологічність, екологічну безпеку тощо).

Мета даної роботи міститься в підвищенні якості процесу виготовлення та ремонту деталей НО АЕС шляхом синтезу раціонального варіанту технології формування їх робочих поверхонь. В результаті, ґрунтуючись на проведених теоретичних дослідженнях розроблена формалізована модель генерації раціональних варіантів технологій виготовлення деталей насосів АЕС, яка враховує кожний етап життєвого циклу виробу, та дозволяє сформувати множину раціональних рішень, з використанням різних методів реалізації або їх комбінацій. Розроблено метод синтезу варіантів технологій досягнення необхідної якості поверхні деталей насосів АЕС при їх виготовленні та ремонті, який враховує вимоги по надійності роботи обладнання та його екологічній безпечності. Також розроблена система спрямованого вибору раціонального варіанту вибору технології виготовлення деталей насосів, яка дозволяє забезпечити необхідну якість робочих поверхонь найбільш економічними методами.

Ключові слова: *спрямований вибір, технологія, насосне обладнання атомних електростанцій, надійність, якість, екологічна безпека.*

I. V. KONOPLIANCHENKO
Ph.D., Associate Professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-4814-1796

N. V. TARELNYK
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6304-6925

DEVELOPMENT OF A DIRECTED CHOICE SYSTEM FOR THE REQUIRED QUALITY ACHIEVING TECHNOLOGY OF NPP PUMPING EQUIPMENT SURFACE PARTS DURING THEIR MANUFACTURING AND REPAIR

The presented article notes the relevance of effective operation and maintenance of pumping equipment (PE) to ensure the safety and stability of nuclear power plants (NPP). This is important not only for maintaining the material condition of the plant, but also affects overall safety, as well as increasing operational efficiency and reducing operating costs. An analysis of existing works in this direction shows that the directed choice system of technology for achieving the required surface quality of pumping equipment parts at NPP includes all stages of their life cycle, starting from its design and ending with its utilization. At the same time, at each stage there are a number of special methods of directed choice that take into account a bunch of their necessary characteristics (reliability, cost, manufacturability, environmental safety, etc.).

The aim of this work is to improve the quality of the manufacturing and repair process of NPP PE parts by synthesizing a rational variant of the their working surfaces forming technology. As a result, based on the theoretical studies conducted, a formalized model for generating rational options for NPP pump parts manufacturing technologies has been developed,

which takes into account each stage of the product's life cycle and allows for the formation a of rational solutions set, using various implementation methods or their combinations. A method for synthesizing options for technologies for achieving the required surface quality of NPP pump parts during their manufacture and repair has been developed, which takes into account the requirements for the reliability of the equipment and its environmental safety. A directed choice system of a rational option for selection the technology for manufacturing pump parts has also been developed, which allows for the required quality of working surfaces by the most economical methods.

Key words: *directed choice, technology, nuclear power plant pump equipment, reliability, quality, environmental safety.*

Постановка проблеми

Як важливий компонент глобальної енергетичної системи, атомні електростанції (АЕС) залежать від ефективного функціонування та технічного обслуговування їхнього обладнання для забезпечення безпеки та стабільності. Технічне обслуговування атомних електростанцій є важливим не тільки для підтримки матеріального стану станції, але й впливає на загальну безпеку, а також на підвищення ефективності експлуатації та зниження витрат на експлуатацію [1].

Щоб забезпечити безпечне, надійне та ефективне виробництво енергії, експлуатаційне технічне обслуговування АЕС повинно здійснюватися відповідно до суворих технічних умов. Безпечні, надійні та економічні атомні електростанції зазвичай демонструють дбайливу, консервативну експлуатацію та суворі, добре сплановані заходи з технічного обслуговування, щоб мінімізувати ризики для працівників, населення та навколишнього середовища. Добре керовані атомні електростанції постійно прагнуть покращувати свої стандарти експлуатації та обслуговування. Технічне обслуговування включає профілактичні та коригувальні заходи, які гарантують, що конструкції, системи та компоненти здатні виконувати свої проектні функції. Типова діяльність включає капітальний ремонт, ремонт і заміну системних компонентів і може бути покращена шляхом тестування, калібрування та перевірок під час експлуатації [2].

Система спрямованого вибору технології досягнення потрібної якості поверхні деталей насосного обладнання на АЕС, включає в себе всі етапи їх життєвого циклу починаючи з її конструкції і закінчуючи її утилізацією. При цьому на кожному етапі існує низка спеціальних методів спрямованого вибору, які враховують купу їх необхідних характеристик (надійність, вартість, технологічність, екологічну безпеку тощо). Не менш важливим є врахування впливу методів, що обираються на кожному етапі, одного на інший, тому що в кінцевому результаті це може суттєво сказатись на якості поверхневого шару обраної деталі, а також на виробі в цілому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Загальна кількість проблем та завдань, які потрібно вирішити під час розробки технології досягнення необхідної якості поверхні деталей насосів АЕС при їх виготовленні та ремонті, характеризують предметну область методики в дійсному дослідженні. Для отримання кінцевого результату згідно вибору необхідної якості поверхневого шару деталі потрібно виділити дві стадії її існування: інформаційну, що складається з науково-технічної підготовки виробництва: конструкторської підготовки виробництва (КПВ) і технологічної підготовки виробництва (ТПВ) та матеріальну (виробництво, експлуатацію, ремонт і утилізацію), які тісно пов'язані між собою [3].

Роль інформаційної сфери дуже швидко зростає, з'являються нові і досить перспективні технології, велика увага приділяється розробці екологічно безпечних методів впливу на поверхневий шар деталей, покращенню його властивостей тощо. Незважаючи на це, використання розроблених нових технологій, потребує, особливо на стадіях виробництва і ремонту, таких технологічних рішень, щоб була можливість управляти параметрами якості поверхні. Наприклад, в умовах виробництва, працівники повинні точно знати, який час потрібно витримувати деталь з конкретного матеріалу (сталь 20, 40Х, 38Х2МЮА, чавун ВЧ60-2, СЧ40 тощо) в камері установки іонного азотування, щоб отримати шар підвищеної твердості в конкретних межах. Передчасне зупинення і вивантаження деталі призведе до браку, а перетримка більше за визначений час – до значних непотрібних збитків електроенергії, а також збільшення людської праці. Тому для управління параметрами якості поверхонь деталей, перед запуском технології їх виготовлення, необхідно провести низку дослідів і встановити аналітичні залежності їх величини від технологічних режимів що на них впливають.

В [4] показано, що відпрацювання на технологічність конструкцій виробів та деталей це один з найважливіших етапів ТПВ. Автори в якості доказу показують, що при удосконаленні технологічності конструкції виробу можна зменшити трудомісткість складання на 8 … 12 %, а деколи і на 20 %, а її собівартість до 10 %.

Під час відпрацюванні на технологічність потрібно враховувати всі стадій життєвого циклу деталі (рис. 1). При цьому коригуються усі, чи окремі, параметри якості і властивості поверхонь деталей або обирається більш раціональна їх технологія. При цілеспрямованому корегуванню технологічною раціональністю конструкції деталей насосу можна значно змінювати економічні, енергетичні, екологічні та інші показники виробництва, а також показники параметрів якості їх поверхонь, та методи їх досягнення.

Основною вимогою, на всіх стадіях життьового циклу деталей насосів АЕС є надійність, тому що відхилення від цих вимог може привести, в кращому випадку до незапланованої зупинки обладнання, а в гіршому до значної аварії.



Рис. 1. Використання системи спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості поверхневих шарів деталей насосів АЕС на різних етапах життєвого циклу

Під час КПВ, при проектуванні деталі, яка виконує свої визначенні функції, конструктор повинен знати методи, завдяки яким поверхня отримає необхідні характеристики (твердість, глибину зміцнення, або шару зниженої твердості, яким методом можна цього досягнути тощо) та відповідно призначати ці методи впливу (технологічна раціональність конструкції). Практика показує, що таких методів може бути багато. Досягнути підвищення твердості поверхневого шару стальної деталі можна використовуючи одну з технологій ХТО (цементацію, азотування, нітроцементацію, алітування тощо), обробку ППД, лазерну обробку, метод ЕІЛ і таке інше. Обираючи необхідний метод потрібної характеристики поверхні деталі перевагу, в першу чергу, потрібно віддавати досягненню при цьому її надійності, потім екологічній безпеці самого методу і нарешті його собівартості. При використанні для підвищення твердості поверхневого шару метода ЕІЛ відомо, що він є екологічно безпечним і по собівартості менший серед інших методів, але значно програє їм по надійності так як після його використання знижується втомлювальна міцність деталі. Тому метод ЕІЛ неможливо використовувати для обробки деталей насосів АЕС без додаткової обробки ППД, після якої величина втомлювальної міцності стає більше чим була до обробки ЕІЛ.

На етапі ТВП, при плануванні раціональної технології заданих властивостей поверхонь, також в першу чергу потрібно враховувати досягнення потрібної характеристики надійності, далі екологічній безпеці і собівартості самого методу.

Використовуючи результати запланованих параметрів якості поверхневого шару деталі, з'явиться можливість розробити більш раціональну технологію отримання заготовки (з більш дешевшого, але не менш надійного матеріалу, використання заготовок з меншими припусками на обробку, проведення термічної обробки не всій поверхні, а в конкретному, локальному місці тощо) [5]. З появою нових методів виготовлення деталей механічну обробку металорізальними інструментами можна замінити іншими методами (виготовленням на 3D принтері, електроерозійною обробкою тощо) які більш підходять для будування основи формування поверхневого шару з потрібними параметрами якості і які більш обґрунтовані з точки зору надійності, екологічної безпеки і економіки.

Технологія управління параметрами якості поверхневого шару потрібна і на етапі планування і використання процесу складання деталей [6]. Стан поверхневого шару має значний вплив на якість складання і відрізняється при різній операціях складання: пайці, зварюванні, склеюванні, з натягом тощо.

В залежності від якості поверхневого шару деталі використовуються ті, або інші методи контролю її властивостей і проведення потрібних іспитів [7].

На стадії експлуатації виробу (насосу), володіючи технологією управління параметрами якості поверхневого шару деталей, з'являється можливість більш раціонального його використання в тих чи інших умовах виробництва на АЕС.

На етапі проведення ремонту насосів, використання системи спрямованого вибору потрібної технології отримання параметрів якості поверхонь деталей, дозволяє більш вдало вирішувати виникаючі проблеми їх ремонтопридатності, а використання результатів наукових досліджень, дуже часто дозволяє ремонт змінювати на реновацію, а інколи позволяє провести модернізацію окремого вузла або всього насосу [8].

Надійність повинна бути на першому місці і на етапі утилізації насосів АЕС. Особливо це відноситься до насосів, що знаходились при технічному обслуговуванні й ремонті енергоблоків, коли радіоактивними стають деталі заміненого обладнання, використовуваний інструмент, труби тощо. Тверді радіоактивні відходи після переробки зберігають у сховищах, спеціально споруджених на території АЕС [9].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є підвищення якості процесу виготовлення та ремонту деталей насосного обладнання АЕС шляхом синтезу раціонального варіанту технології формування їх робочих поверхонь.

Викладення основного матеріалу дослідження

Математично життєвий цикл виробу можна представити у вигляді множини раціональних рішень (реалізацій задачі) на кожному етапі циклу. При цьому існує множина рішень з використанням різних методів реалізації або їх комбінацій. Задача спрямованого вибору полягає в тому, щоб знайти таку сукупність методів на кожному етапі життєвого циклу, яка в результаті приведе до рішення, оптимізованого з точки зору вибраних критеріїв, таких як надійність роботи обладнання, його екологічна безпечність, мінімальна собівартість виготовлення виробу при цьому повинні дотримуватися показники якості процесу виготовлення виробу та досягнення його технічних характеристик.

Рішення задачі припускає наявність множин варіантів її реалізації, тому з математичної точки зору вона представляється у вигляді матриці рішень $R = [r_i]$.

$$r_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо рішення існує} \\ 0, \text{ в протилежному випадку} \end{cases}$$

Таким чином відбувається відсіювання всіх варіантів рішення задачі, які не відповідають необхідним умовам її реалізації.

Із сукупності варіантів, що реалізуються, та які дозволяють досягти рішення R_0 формується граф (рис. 2), в якому m – є складністю реалізації (кількістю етапів).

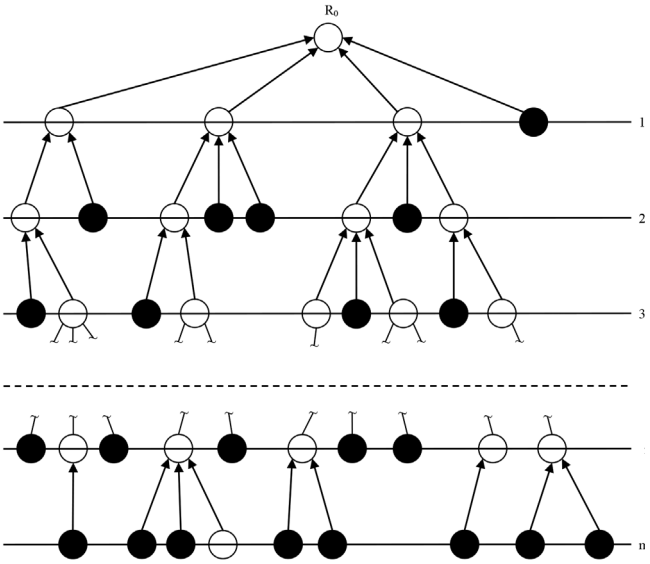


Рис. 2. Граф рішення задачи, що складається з *m* етапів

При цьому в якості вузлів графу виступають методи рішення етапу задачі, а ребрами графу є технології, які дозволяють реалізувати конкретний метод.

Таким чином множину існуючих варіантів рішення можна записати у вигляді:

$$\Omega^n\{R_0(r_i)\} = R^1\{r_i\} \cup R^2\{r_i\} \cup \ldots \cup R^{m-1}\{r_i\} \cup R^m\{r_i\},$$

де $R^{1\ldots m}\{r_i\}$ – множина варіацій рішення задачі на всіх m етапах в межах n-го етапу життєвого циклу виробу. В цьому випадку умовою формування множин буде:

$$R^j\{r_i\} = \cup R\{r_i\} | r_i = 1.$$

Тобто на кожному етапі життєвого циклу виробу існує множина досяжності реалізацій для якої повинна виконуватися умова:

$$\Omega^n\{R_0(r_i)\}\Big|_{\{R_0(r_i)\}\notin\varnothing}^{r_i=1}.$$

В цьому випадку загальна математична модель сукупності рішень з урахуванням кожного етапу життєвого циклу виробу має вигляд:

$$\Psi\{R_0(r_i)\}=\Omega^1\{R_0^1(r_i)\}\cup\Omega^2\{R_0^2(r_i)\}\cup\ldots$$
$$\ldots\cup\Omega^{n-1}\{R_0^{n-1}(r_i)\}\cup\Omega^n\{R_0^n(r_i)\}.$$

На рисунку 3 наведена схема пошуку раціонального варіанту рішення, який буде задовольняти заданим критеріям оптимізації, з урахуванням технологічних обмежень та впливу кожного етапу життєвого циклу виробу від конструкторсько-технологічної підготовки виробництва до етапу виводу виробу з експлуатації та його безпечної утилізації. Дана задача пошуку є багатокритеріальною, а саме за критерієм надійності роботи виробу – P, екологічної безпеки – χ, та економічної доцільності впровадження інженерних рішень – C. При чому економічна доцільність перевіряється з урахуванням всіх етапів життєвого циклу виробу. Тобто в межах одного етапу може бути згенерована множина рішень, які є найкращими з точки зору екологічної безпеки та експлуатаційної надійності, але мають різну технологічну собівартість їх реалізації. В якості раціонального варіанту рішення приймається той, який має мінімальну сумарну технологічну собівартість по всіх етапах життєвого циклу виробу.

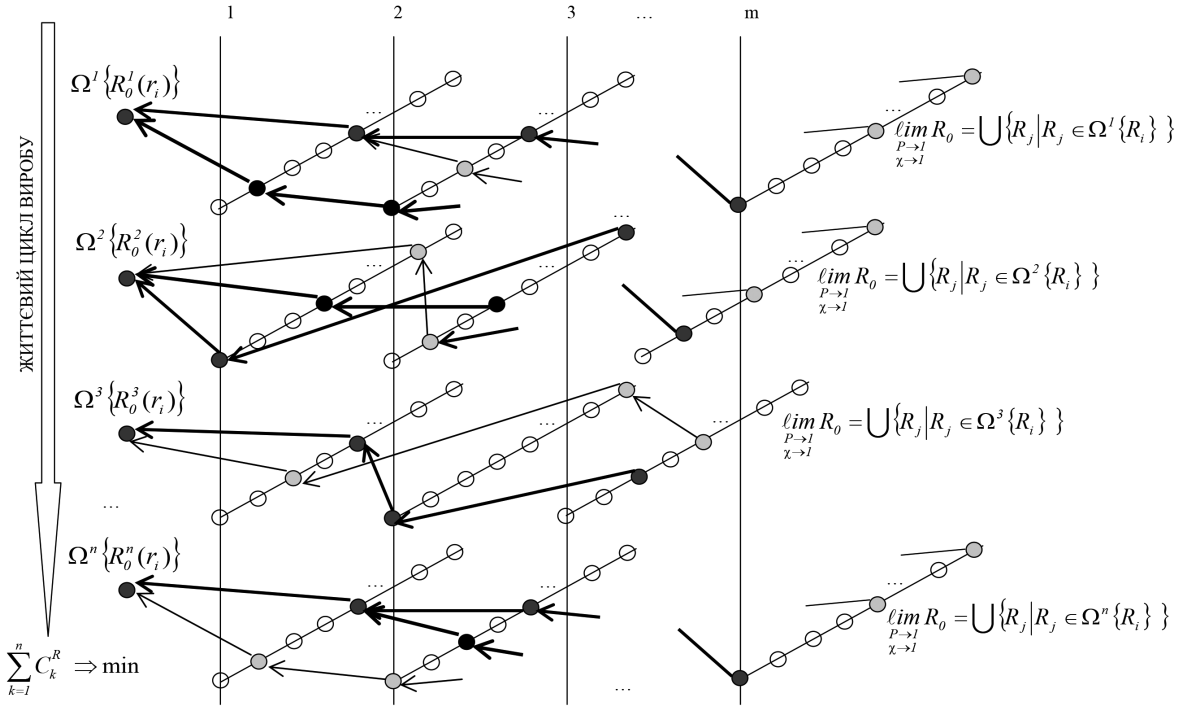


Рис. 3. Схема пошуку раціонального варіанту загального рішення на кожному етапі життєвого циклу виробу

Розглянемо докладно критерії, за якими здійснюється пошук раціонального варіанту.

Кількісна оцінка екологічної безпеки процесу виготовлення виробу, його експлуатації, ремонту (модернізації), та утилізації здійснюється з використанням функції Харрінгтона яка в загальному вигляді описується наступною моделлю [10]:

$$D=\sqrt[\sum_{k=1}^{n}a_k]{\prod_{k=1}^{n}D_k^{\,a_k}},$$

де D_k – узагальнена функція бажаності по екологічній безпеці для k-го, виробничого процесу, що має вагу a_k; n – загальна кількість технологічних процесів у виробництві.

При цьому прийняте рішення на кожному етапі життєвого циклу виробу має вигляд функції:

$$D_k=\sqrt[\sum_{i=1}^{m}a_i]{\prod_{i=1}^{m}d_i^{\,a_i}}, \qquad (1)$$

де d_i – часткова функція бажаності екологічної безпеки i-го прийнятого рішення, яке має вагу a_i; m – кількість реалізованих рішень в межах окремого етапу життєвого циклу виробу.

Критерій надійності роботи обладнання теж повинен розглядатися с точки зору життєвого циклу виробу, так як показники експлуатаційної надійності обладнання закладаються на етапі конструкторсько-технологічної підготовки, забезпечуються під час виготовлення виробу, контролюються в період його експлуатації, та дотримуються під час ремонту та модернізації, що в сукупності продовжує термін роботи обладнання до видову із експлуатації.

В якості економічного критерію, як правило, використовують технологічну собівартість. На рисунку 4 наведена мережева модель прийняття рішень, що реалізуються n методами в середині m-го етапу реалізації. В якості вузлів в моделі виступають методи, а ребрами є собівартість їх реалізації.

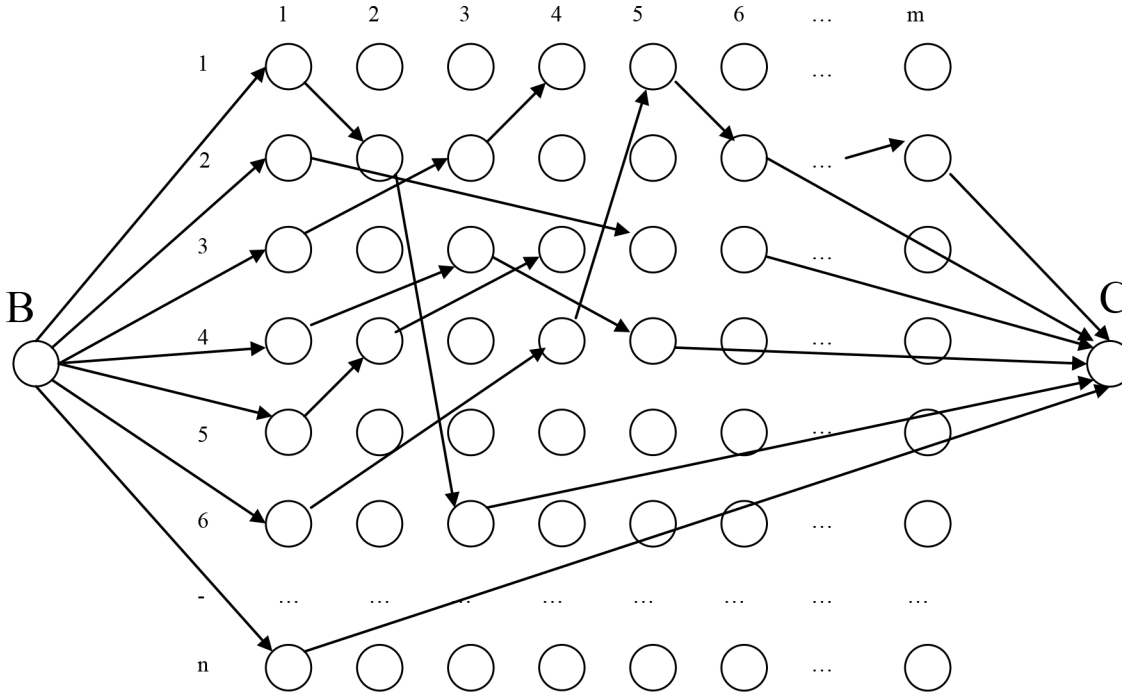


Рис. 4. Мережева модель пошуку раціонального рішення

Оптимізаційна задача в такій моделі вирішується методом лінійного програмування, тобто пошуку шляху із мінімальною сукупною собівартістю.

При оптимізації, як вагова функція, виступає саме технологічна собівартість (ω), яка додається на кожному етапі, в залежності від кількості відрізків та їх ваги, де повний шлях буде дорівнювати сукупності всіх ребер, що в нього входять $p = \langle \nu_0, \nu_1, \ldots, \nu_k \rangle$. В загальному вигляді функція представляється як:

$$\omega(p) = \sum_{i=1}^{k} \omega(\nu_{i-1}, \nu_i).$$

Пошук шляху від витоку B до стоку C, я кий має найменшу вагу визначається залежністю:

$$\delta(B,C) = \begin{cases} \min\left\{\omega(p) : B \xrightarrow{p} C\right\}, & \text{якщо є шлях } B, C \\ \infty, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Найкоротшим є шлях, сукупна вага якого відповідає залежності:

$$\omega(p) = \delta(B, C).$$

В цьому випадку критерій оптимізації буде мати вигляд:

$$\omega = f(\alpha, \lambda),$$

де α – параметр, який залежить від методу та підлягає керуванню; λ – технологічні обмеження при реалізації конкретного методу.

При оцінці екологічної безпечності процесу теж можна використовувати мережеву модель, яка наведена на рис. 4, але в цьому випадку ваговою функцією (χ) буде функція бажаності Харрінгтона (1), яка змінює

своє значення в діапазоні від 0 до 1. Де «1» дорівнює найвищому рівню екологічної безпеки, а «0» відповідно найнижчому рівню, тобто максимально небезпечному процесу. І оптимізаційна задача зводиться до пошуку найдовшого шляху. В цьому випадку шлях $p = \langle \eta_0, \eta_1, \ldots, \eta_k \rangle$ буде визначатися загальною сумою ваги ребер:

$$\chi(p) = \sum_{i=1}^{k} \chi(\eta_{i-1}, \eta_i).$$

Тоді найдовший шлях від витоку B до стоку C визначається згідно залежності:

$$\beta(B,C) = \begin{cases} \max\left\{\chi(p) : B \xrightarrow{p} C\right\}, & \text{якщо є шлях } B,C \\ 0, & \text{в протилежному випадку} \end{cases}$$

Найдовшим буде шлях, сукупна вага якого відповідає залежності:

$$\chi(p) = \beta(B, C).$$

Задачу пошуку оптимального варіанта вирішують комплексно, з урахуванням як економічної так і екологічної складової.

На технологічному рівні задача пошуку варіанта рішення буде виконуватися згідно умови:

$$(\exists\psi \in \Theta)R(\psi) = \bigcap_{\zeta=1}^{m} \mathrm{E}^{\zeta}\{S_i\} \vee (\exists\varphi \in \phi)\mathrm{M}(\varphi) \vee$$
$$\vee (\exists\xi \in \theta)\mathrm{O}(\xi) \vee (\exists\tau \in \gamma)\mathrm{T}(\tau) \vee (\exists\mu \in \vartheta)\underset{\vartheta \neq Co}{\Phi(\mu)},$$

де $(\exists\psi \in \Theta)R(\psi)$ – квантор існування (існує хоча б один варіант вирішення завдання); $\bigcap_{\zeta=1}^{m} \mathrm{E}^{\zeta}\{S_i\}$ – сукупність етапів розв'язання задачі; $(\exists\phi \in \varphi)M(\phi)$, $(\exists\xi \in \theta)O(\xi)$, $(\exists\tau \in \gamma)T(\tau)$ – наявність в кожному етапі хоча б одного методу вирішення задачі, який можна реалізувати на існуючому технологічному обладнання, що має відповідні технологічні режими.

Окремою вимогою процесу виготовлення насосів АЕС, та їх деталей, що працюють в умовах радіаційного опромінення є те, що всі матеріали, які застосовуються при їх виготовленні, ремонту та модернізації не повинні містити кобальт (Co) як в чистому вигляді, так і в сполуках. Тобто повинний існувати хоча б один варіант сукупності таких матеріалів, необхідних для реалізації технології – $(\exists\mu \in \vartheta)\underset{\vartheta \neq Co}{\Phi(\mu)}$.

Як технологічне обмеження, виступає якість процесу, тобто на результат включення рішення до множини рішень, що підлягають реалізації впливає здатність забезпечення необхідного рівня показників якості:

$$(\forall\varsigma \in \Xi)R(\varsigma) = \{R \mid q_R^{\min} \le q_R \le q_R^{\max}\},$$

тобто критерії якості процесу повинні знаходиться в області допустимих значень $q_R^{\min} \le q_R \le q_R^{\max}$.

Включення варіанту рішення задачі в множину варіантів, що підлягають реалізації відбувається також із врахуванням екологічної безпеки процесу та експлуатаційної надійності виробу:

$$(\forall\varepsilon \in \mathrm{E})R(\varepsilon) = \left\{ R \middle| \begin{matrix} 0 \le \chi_R \le 1 \\ \chi_R \to 1 \end{matrix} \right\}, \quad (\forall\varpi \in \Lambda)R(\varpi) = \left\{ R \middle| \begin{matrix} 0 \le P_R \le 1 \\ P_R \to 1 \end{matrix} \right\}$$

де для всіх варіантів реалізації технології закладені критерії, щодо екологічної безпеки процесу, та експлуатаційної надійності виробів повинні знаходиться в межах: $0 \le \chi_R \le 1$ та $0 \le P_R \le 1$ відповідно, при цьому показники повинні бути наближеними до «1». Остаточною вимогою до множини рішень буде:

$$\left\{C_R\right\} = \bigcup_{k \in \mathrm{X}} \left\{ C_R(k) \middle| \begin{matrix} (\exists\psi \in \Theta)R(\psi) = \bigcap_{\zeta=1}^{m} \mathrm{E}^{\zeta}\{S_i\} \vee (\exists\varphi \in \phi)\mathrm{M}(\varphi) \vee \\ \vee (\exists\xi \in \theta)\mathrm{O}(\xi) \vee (\exists\tau \in \gamma)\mathrm{T}(\tau) \vee (\exists\mu \in \vartheta)\underset{\vartheta \neq Co}{\Phi(\mu)}, \\ (\forall\varsigma \in \Xi)R(\varsigma) = \{R \mid q_R^{\max} \le q_R \le q_R^{\max}\}, \\ (\forall\varepsilon \in \mathrm{E})R(\varepsilon) = \left\{ R \middle| \begin{matrix} 0 \le \chi_R \le 1 \\ \chi_R \to 1 \end{matrix} \right\} \\ (\forall\varpi \in \Lambda)R(\varpi) = \left\{ R \middle| \begin{matrix} 0 \le P_R \le 1 \\ P_R \to 1 \end{matrix} \right\} \end{matrix} \right\}.$$

Тоді оптимізаційна задача за економічним критерієм описується математичною моделлю:

$$R^{opt} = \lim_{C \to \min} \sum_{k=1}^{n} C_R^k \begin{vmatrix} R \in \Psi\left\{R_0(r_i)\right\} \\ q_\varsigma \in \{q_R\}; q_R^{\max} \le q_R \le q_R^{\max} \\ \chi_\varepsilon \in \left\{\chi_R\right\}; \chi_R \to 1 \\ P_\varpi \in \left\{P_R\right\}; P_R \to 1 \end{vmatrix}.$$

З множини відібраних варіантів рішення, що відповідають умовам, обирається той, що має мінімальну сумарну технологічну собівартість по всім етапам життєвого циклу виробу.

Слід відмітити, що оптимізація може бути структурною, коли оптимізується кількість задіяних методів або нанесених на поверхню шарів покриття, а також параметричною оптимізацією, коли оптимізуються параметри технологій, які беруть участь в формуванні поверхні із заданими властивостями.

Використання системи спрямованого вибору технології досягнення потрібної якості поверхонь деталей дозволяє уникнути застосування при формуванні покриттів деталей елементів, які при опроміненні стають джерелом небезпечних довгоживучих ізотопів. Насамперед, це стосується кобальту. При утилізації потрібно не тільки зберегти усі важливі матеріали, а і забезпечити екологічну безпеку при похованні шкідливих речовин.

Висновки

1. Ґрунтуючись на проведених теоретичних дослідженнях розроблена формалізована модель генерації раціональних варіантів технологій виготовлення деталей насосів АЕС, яка враховує кожний етап життєвого циклу виробу, та дозволяє сформувати множину раціональних рішень, з використанням різних методів реалізації або їх комбінацій.

2. Розроблено метод синтезу варіантів технологій досягнення необхідної якості поверхні деталей насосів АЕС при їх виготовленні та ремонті, який враховує вимоги по надійності роботи обладнання та його екологічній безпечності.

3. Розроблена система спрямованого вибору раціонального варіанту вибору технології виготовлення деталей насосів, яка дозволяє забезпечити необхідну якість робочих поверхонь найбільш економічними методами.

Список використаної літератури

1. Nuclear Power Plant Maintenance: Impact on Longevity. Режим доступу: https: // www.dombor.com/fr/nuclear-power-plant-maintenance/

2. Operation and maintenance of nuclear power plants. Режим доступу: https: // www.iaea.org/topics/operation-and-maintenance

3. Майфат М. М. Технологічне забезпечення захисту деталей машин, що працюють в умовах гідроабразивного зношування, високоефективними взаємодоповнюючими комбінованими методами: дис. … канд. техн. наук: 133-Галузеве машинобудування. Суми, 2024. 200 с.

4. Лапковський С. В., Солдатова М. О., Трудько І. С. Відпрацювання конструкції виробу на технологічність – один із найважливіших етапів технологічної підготовки виробництва. *Вісник НТУ України «Київський політехнічний інститут»*. 2011. № 63. С. 203–207.

5. Гущин О. В. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин: посібник. Краматорськ : ДДМА, 2019. 159 с.

6. Коноплянченко Є. В., Чибіряк Я. І., Колодненко В. М. Особливості застосування часового резервування при забезпеченні надійності складних систем. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2017. № 8. С. 21–28.

7. Тарельник Н. В. Удосконалення технології електроіскрового легування деталей насосів атомних електростанцій. *ВІСНИК ХНТУ*. 2024. № 3(90). С. 141–146. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.18

8. Тарельник Н. В. Проблеми і перспективи розробки технології модифікації поверхонь деталей насосів атомних електростанцій. *Вісник СНАУ*. 2024. № 3(57). С. 32–42. https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3

9. Носовский А. В., Алексєєва З. М., Борозенець Г. П. Поводження з радіоактивними відходами. – К. : Техніка, 2007. С. 84–135.

10. Дубницький В. Ю., Кобилін А. М., Кобилін О. А., Кушнерук Ю. І., Ходирєв О. І. Обчислення значень функції Харрінгтона (функції бажаності) при інтервальному визначенні її аргументів. *Сучасні інформаційні системи*. 2023. Т. 7, № 1. С. 71–81. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_5_21

References

1. Nuclear Power Plant Maintenance: Impact on Longevity. Retrieved from: https: // www.dombor.com/fr/nuclear-power-plant-maintenance/

2. Operation and maintenance of nuclear power plants. Retrieved from: https://www.iaea.org/topics/operation-and-maintenance

3. Maifat M.M. (2024) Tekhnolohichne zabezpechennia zakhystu detalei mashyn, shcho pratsiuiut v umovakh hidroabrazyvnoho znoshuvannia, vysokoefektyvnymy vzaiemodopovniuiuchymy kombinovanymy metodamy [Technological support for the protection of machine parts operating in conditions of hydroabrasive wear by highly effective complementary combined methods]: dys. kand. tekhn. nauk: 133-Haluzeve mashynobuduvannia. Sumy, 200 p.

4. Lapkovskyi S.V., Soldatova M.O., Trudko I.S. (2011) Vidpratsiuvannia konstruktsii vyrobu na tekhnolohichnist – odyn iz naivazhlyvishykh etapiv tekhnolohichnoi pidhotovky vyrobnytstva [Working out the design of the product for manufacturability is one of the most important stages of technological preparation of production]. *Visnyk NTU Ukrainy "Kyivskyi politekhnichnyi instytut"*. № 63. pp. 203–207.

5. Hushchyn O.V. (2019) Tekhnolohichni metody vyrobnytstva zahotovok detalei mashyn [Technological methods of production of blanks of machine parts]: posibnyk. Kramatorsk: DDMA, 159 p.

6. Konoplianchenko Ye.V., Chybiriak Ya.I., Kolodnenko V.M. (2017) Osoblyvosti zastosuvannia chasovoho rezervuvannia pry zabezpechenni nadiinosti skladnykh system [Peculiarities of the use of time redundancy when ensuring the reliability of complex systems]. *Tekhnichnyi servis ahropromyslovoho, lisovoho ta transportnoho kompleksiv*. № 8. pp. 21–28.

7. Tarelnyk N.V. (2024) Udoskonalennia tekhnolohii elektroiskrovoho lehuvannia detalei nasosiv atomnykh elektrostantsii [Improvement of the technology of electrospark alloying of pump parts of nuclear power plants]. *VISNYK KhNTU*. № 3(90). pp. 141–146. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.3.18

8. Tarelnyk N.V. (2024) Problemy i perspektyvy rozrobky tekhnolohii modyfikatsii poverkhon detalei nasosiv atomnykh elektrostantsii [Problems and prospects of developing the technology of modification of the surfaces of pump parts of nuclear power plants]. *Visnyk SNAU*. № 3(57). pp. 32–42. https://doi.org/10.32782/msnau.2024.3

9. Nosovskyi A.V., Aleksieieva Z.M., Borozenets H.P. (2007) Povodzhennia z radioaktyvnymy vidkhodamy [Management of radioactive waste]. – K. : Tekhnika, pp. 84–135.

10. Dubnytskyi V.Iu., Kobylin A.M., Kobylin O.A., Kushneruk Yu.I., Khodyriev O.I. (2023) Obchyslennia znachen funktsii Kharrinhtona (funktsii bazhanosti) pry intervalnomu vyznachenni yii arhumentiv [Calculation of the values of the Harrington function (desirability function) in the interval determination of its arguments]. *Suchasni informatsiini systemy*. T. 7, № 1. pp. 71–81. Retrieved from: http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_5_21

UDC 66.074.3:661.98 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.13

S. I. KUZNIETSOV
Ph.D., Assistant Professor at the Department of Chemical Technologies,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-1766-931X

O. O. VENHER
Ph.D., Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department of Chemical Technologies,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0065-0375

V. M. BEZPALCHENKO
Ph.D., Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department of Chemical Technologies,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1355-7938

O. O. SEMENCHENKO
Ph.D., Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department of Chemical Technologies,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1251-2711

YE. S. IVKINA
Student at the Faculty of Information Technologies and Design
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0007-7052-807X

CLASSIFICATION OF METHODS FOR SANITARY PURIFICATION OF GASES FROM NITROGEN OXIDES

Nitrogen oxides are among the most common and dangerous air pollutants. Their main amount is formed during high-temperature combustion of organic fuels in thermal power plants. Sources of nitrogen oxide emissions into the atmosphere differ in the amount of exhaust gases, the content of nitrogen compounds and other impurities, as well as the degree of oxidation of nitrogen oxide (II) (NO), *temperature and pressure. In order to systematize the developed methods and conduct targeted research in this area, a classification of methods for sanitary purification of gases from nitrogen oxides was carried out. This classification is based on the ability of nitrogen oxides to oxidize, reduce, sorb and form substances that are easily regenerated under various conditions. The processes of* NO *oxidation using liquid, solid and gaseous oxidants were studied. Kinetic equations were obtained that describe the rate of this process depending on the concentration of solutions, temperature and pH of the medium. A high-temperature method has been developed in which thermal decomposition of nitrogen oxides occurs in the temperature range from 500 °C to 5000 °C using an arc plasmatron with a tungsten cathode and a copper anode. The catalytic properties of natural and artificial materials for increasing the rate of* NO *oxidation have been studied. It has been established that the reaction of heterogeneous catalytic oxidation of* NO *has a positive temperature coefficient. Catalysts capable of increasing the reaction rate by 1.5–2.5 times have been proposed. The considered purification methods can be used in the nitric acid industry during the operation of large units to achieve the maximum permissible concentration (MPC) standards in the surface layer of the atmosphere.*

Key words: *sanitary gas purification, nitrogen oxides.*

С. І. КУЗНЄЦОВ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-1766-931X

О. О. ВЕНГЕР
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0065-0375

В. М. БЕЗПАЛЬЧЕНКО
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1355-7938

О. О. СЕМЕНЧЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1251-2711

Є. С. ІВКІНА
студентка факультету інформаційних технологій та дизайну
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0007-7052-807X

КЛАСИФІКАЦІЯ МЕТОДІВ САНІТАРНОГО ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ОКСИДІВ НІТРОГЕНУ

Оксиди нітрогену належать до найпоширеніших і найнебезпечніших забруднювачів повітря. Основна їх кількість утворюється під час високотемпературного спалювання органічного палива в теплоенергетичних установках. Джерела викидів оксидів нітрогену в атмосферу різняться за кількістю відхідних газів, вмістом сполук нітрогену та інших домішок, а також за ступенем окиснюваності оксиду нітрогену (II) (NO), *температурою і тиском. З метою систематизації розроблених методів і цілеспрямованого проведення досліджень у цій галузі було здійснено класифікацію методів санітарного очищення газів від оксидів нітрогену. Ця класифікація базується на здатності оксидів нітрогену окиснюватися, відновлюватися, сорбуватися та утворювати речовини, які легко регенеруються за різних умов. Досліджено процеси окиснення* NO *за допомогою рідких, твердих і газоподібних окиснювачів. Отримано кінетичні рівняння, які описують швидкість цього процесу залежно від концентрації розчинів, температури та pH середовища. Розроблено високотемпературний метод, у якому термічний розклад оксидів нітрогену відбувається в діапазоні температур від 500 °С до 5000 °С із використанням дугового плазмотрона з вольфрамовим катодом і мідним анодом. Досліджено каталітичні властивості природних і штучних матеріалів для підвищення швидкості окиснення NO. Встановлено, що реакція гетерогенного каталітичного окиснення* NO *має позитивний температурний коефіцієнт. Запропоновано каталізатори, здатні збільшувати швидкість реакції в 1,5–2,5 рази. Розглянуті методи очищення можуть застосовуватися в азотно-кислотній промисловості під час експлуатації великих агрегатів для досягнення норм гранично допустимої концентрації (ГДК) у приземному шарі атмосфери.*

Ключові слова: *санітарне очищення газів, оксиди азоту.*

Problem statement

Pollution of the Earth's atmosphere or pollution air occurs when harmful or excessive amounts of substances, including gases (such as carbon dioxide, carbon monoxide, sulfur dioxide, nitrogen oxides, methane, and chlorofluorocarbons) enter the Earth's atmosphere [1]. On the basis of this, the limit-permissible concentrations (LPC) for a number of the most common pollutants are established [2, 3]. Visual evidence of the influence of atmospheric air pollution on human health is provided by statistical data on mass diseases of the population in large industrial cities and cases of catastrophic consequences caused by atmospheric pollution [4]. Nitrogen oxides are among the most widespread and dangerous air pollutants on our planet [5]. There are seven oxides of nitrogen that may be found in the ambient air. However, nitric oxide (NO) and nitrogen dioxide (NO_2) are the two principal nitrogen oxides associated with combustion sources. Ambient concentrations of these two gases vary widely according to local sources and sinks, but can exceed a total concentration ($NO + NO_2$) of 500 mg/m^3 in dense urban areas [6]. Exhaust gases, which include nitrogen oxides, are formed in a number of chemical industries, in oil refining processes, when burning different types of fuel at high temperatures.

Much attention is paid to the problem of cleaning waste gases from harmful substances, but the pace of scientific research in this area lags behind the pace of industrial development [7]. This problem needs to be solved in a short period of time. I have developed effective methods and equipment for cleaning waste gases.

Analysis of the latest research and publications

Analyzing the methods of sanitary cleaning of gases from nitrogen oxides, it can be said that the variety of sources of nitrogen oxide emissions into the atmosphere differ in many parameters [8, 9, 10]. For example, the amount of exhaust gases, the content of nitrogen oxides and other impurities in them, the degree of oxidation of NO, temperature, pressure.

Nitrogen monoxide (NO) is a non-salt-forming, indifferent compound and hardly reacts with most of the known absorbers. In this regard, the preliminary oxidation of NO into NO_2 and N_2O_3 is necessary for more complete extraction of nitrogen oxides from gas mixtures. In industry, the method of homogeneous oxidation of NO in the gas phase using oxygen is used [11]. However, as practice shows, at low concentrations of NO, the rate of homogeneous oxidation of nitrogen oxides is extremely low. From the kinetic equation

$$\frac{d\mathrm{NO}_2}{d\tau} = KP_{\mathrm{NO}}^2 \cdot P_{\mathrm{O}_2}$$

it can be seen that with a decrease in the concentration of NO, for example, from 1.0 % to 0.1 %, i. e. by 10 times, the rate of the oxidation reaction decreases by 100 times. This leads to the necessity of installing bulky and expensive oxidation structures. Sometimes, to intensify the process, oxygen is added to the nitrous gas, increasing its content to 8–10 %. Such a method is not effective due to the extremely small increase in the degree of purification and the low degree of use of dosed oxygen (not more than 0.1–0.5 %). To reduce the concentration of nitrogen oxides in exhaust gases from 0.3 % to 0.15 %, it is necessary to increase the oxygen content in the gas from 3–5 % to 8–10 %, i. e. add about 5000 m^3/h of oxygen. Moreover, only 25–30 m^3/h of oxygen reacts with NO, and the remaining 4870 m^3/h are released into the atmosphere. Developed more effective methods of increasing the rate of oxidation of NO, it is possible to achieve a high degree of purification of gases from nitrogen oxides.

It should be noted that at atmospheric pressure, even highly oxidized nitrous gas, which has a degree of NO oxidation of more than 50 %, cannot be completely extracted from gas mixtures by absorption methods. The final content of nitrogen oxides in exhaust gases is, as a rule, 0.02–0.05 %. Therefore, the sanitary norm of cleaning gases from nitrogen oxides during the oxidation of NO by oxygen in the gas phase can be provided for systems that emit no more than 30–50 thousand m^3 of gas per time. Further intensification of the process of oxidation and absorption of nitrogen oxides is possible with an increase in the rate of oxidation of NO in the liquid phase, or in the presence of catalysts.

The purpose of the work are systematization and classification of existing and new methods of cleaning atmospheric air from nitrogen oxides.

The classification is based on the following physical and chemical properties of nitrogen oxides:

– the ability of nitrogen oxides to be oxidized under the action of liquid, solid and gaseous oxidants;

– the ability of nitrogen oxides to be reduced to molecular nitrogen under the influence of high temperatures, as well as in the presence of liquid, solid and gaseous reducing agents and catalysts;

– the ability of nitrogen oxides to enter into chemical reactions with various groups of substances with the formation of salts and complex compounds that can be regenerated.

According to the proposed classification (Fig. 1), the considered methods of cleaning gases from nitrogen oxides are divided into four classes: oxidative, reducing, sorption, and other methods. Each class is divided into four groups. Each group combines a number of similar cleaning methods. Both existing and new methods of sanitary purification of gases from nitrogen oxides fit into the scheme of the proposed classification.

Oxidative methods of sanitary purification of gases from nitrogen oxides are based on preliminary oxidation of NO with subsequent absorption of NO_2 and N_2O_3 by various absorbers. Conducting numerous experiments on absorption by various absorbers, it was noted that the degree of absorption usually exceeded the theoretically possible. With alkaline absorption of nitrous gas containing 1 % of nitrogen oxides with a degree of oxidation of 30 %, the theoretically possible degree of absorption should be 60 %. It was established by calculation that in the process of absorption, an additional homogeneous oxidation of NO in the gas phase takes place by another 5 %. Consequently, the total possible degree of absorption should be 65 %. In fact, it was possible to obtain an absorption rate of 80–90 % or more in the experiments.

It is possible to conclude that in the process of absorption, the oxidation of nitrogen oxide occurs not only in the gas phase, but also in the liquid phase [12, 13]. This important fact formed the basis of further research conducted under conditions favorable to the process of oxidation of nitrogen oxides in the liquid phase. This gives great advantages, since the amount of the liquid phase in the exchange process is hundreds and thousands of times less than the gas phase. Due to this, technological operations with liquid can be carried out in significantly smaller reaction volumes. Oxidative processes occurring in parallel in liquid and gas media have different speeds. In a liquid environment, the speed is lower than in a gaseous environment. The amount of NO oxidized in the liquid is approximately 50 %. It has been established that for

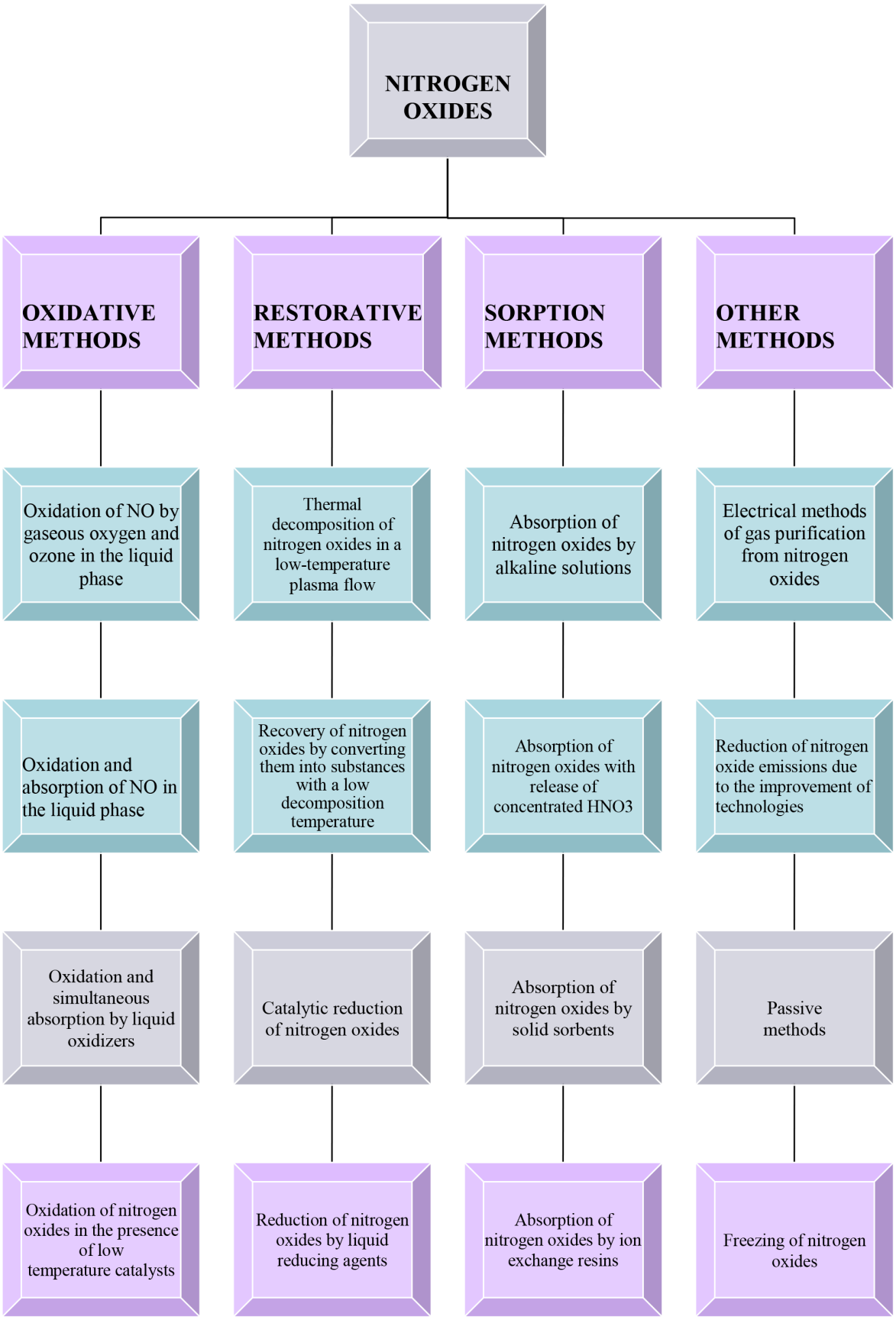


Fig. 1. Classification of methods of sanitary cleaning of gases from nitrogen oxides

the intensification of the oxidation process during the absorption of nitrogen oxides from low-concentration and low-oxidized gases into the gas phase, it is expedient to dose oxygen, bringing its concentration to 6–7 %. A further increase in the concentration of O_2 in nitrous gas is ineffective. Intensification of the process of absorption of nitrogen oxides is possible only by simultaneously increasing the share of NO oxidized in the liquid phase, which is achieved by saturating the working solution with oxygen in the remote reactor.

Absorption methods are a process of selective gas absorption by a liquid. Two phases are involved in absorption processes – liquid and gas. At the same time, the transition of the substance from the gas phase to the liquid phase (during absorption) or, conversely, from the liquid phase to the gas phase (during desorption) occurs. Thus, absorption processes are one of the types of mass transfer. Absorption occurs only if the partial pressure of the absorbed component in the gas phase is greater than the equilibrium partial pressure of the same component above the given solution. The greater the difference between these pressures, the greater the driving force of the process and the faster absorption occurs. The limit state of the system is the achievement of equilibrium, i. e., when only reversible processes are possible.

Physical absorption and chemisorption are distinguished. During physical absorption, the gas is held in the liquid only due to mechanical (physical) bonds and it is not accompanied by a chemical reaction, while during chemisorption, a chemical reaction occurs between the components.

Processes of sanitary purification of gases from nitrogen oxides are based on preliminary oxidation of nitrogen oxide (II) with subsequent absorption of nitrogen oxides (IV) and (III) (NO_2 and N_2O_3) by various absorbers [14]. The limiting stage of the process is the rate of oxidation of nitrogen oxide (II) to nitrogen oxide (IV). Since this reaction takes place in the gas phase, the absorption apparatus must have a sufficiently large free volume, so the absorption process is carried out in multistage packing or plate columns. In experiments on the absorption of nitrogen oxides by various liquid absorbers, the degree of absorption is 80–90 %. In the process of absorption, nitrogen oxides are oxidized not only in a gaseous but also in a liquid medium. The parameters aimed at the intensification of the oxidation process of nitrogen oxide (II) in the liquid phase were investigated, and the rates of NO oxidation in the gas and liquid phases were also compared.

In industry, the method of homogeneous oxidation of NO in the gas phase with the help of oxygen is used. However, as practice shows, at low concentrations of NO, the rate of homogeneous oxidation of nitrogen oxides is extremely low.

One of the methods of intensification of the process of absorption of nitrogen oxides is the oxidation of nitrogen monoxide by oxidants stronger than oxygen, for example, ozone or an ozone-oxygen mixture. The use of ozone is inappropriate due to the low efficiency and high cost of ozone. Studies with the introduction of ozone into the liquid phase showed that in this case ozone acts not only as an oxidizer, but also as a catalyst, which increases the degree of oxidation of nitrogen oxide (II) and the relative rate of absorption by one and a half times. When nitrogen oxides are absorbed by nitric acid, regardless of its initial concentration, the introduction of a small amount of ozone into the liquid phase increases the speed of the absorption process and the degree of oxidation (Table 1).

Table 1

Effect of ozone in the liquid phase on the oxidation of nitrogen oxide (II)

	The maximum concentration of obtained HNO_3, %	Relative rate of absorption
Ozone-free	53	1.0
With ozone in the liquid phase (0.16 %)	60	1.5

Intensification of the process of homogeneous oxidation of nitrogen oxides in the liquid phase by gaseous oxidants (oxygen or ozone) is associated with the diffusion of oxidants into the liquid phase. Diffusion of oxygen into the solution is the slowest stage of homogeneous oxidation of nitrogen oxides in the liquid phase, and therefore it controls the entire process.

The rate of diffusion of gaseous oxidizers in the liquid phase depends on many factors: temperature, pressure, concentration of components, turbulence of flows. To increase the rate of homogeneous oxidation of NO in the liquid phase, it is necessary to influence the system by changing one or more of the listed parameters.

The rate of the NO oxidation reaction can be increased if it is carried out in the liquid phase with the help of liquid oxidizers. In this case, the oxidants are in a liquid state, and the reaction rate will not depend on the diffusion rate of the oxidants in the solution. Thus, the slowest stage of the process is eliminated.

A number of liquid oxidizing agents are known, which are superior in their activity to oxygen. These include aqueous solutions of H_2O_2, $KMnO_4$, $KBrO_3$, $K_2Cr_2O_7$, $(NH_4)_2Cr_2O_7$, Na_2CrO_4, $KClO_4$, $NaClO_2$, $K_2S_2O_3$, $(NH_4)_2S_2O_8$, NH_4ClO_4, $K_2Cl_2O_7$, $K_2S_2O_7$, HNO_3. Some of these oxidizers are of theoretical and practical interest for the process of oxidation of nitrogen oxide (II) for the purpose of sanitary gas purification. To study the NO oxidation process, the following liquid oxidants were taken: H_2O_2, $KMnO_4$, $KBrO_3$, $K_2Cr_2O_7$, Na_2CrO_4, $(NH_4)_2Cr_2O_7$, NaOCl, HNO_3 and royal jelly vodka. To find out the principle possibility of interaction of nitrogen oxides with the listed liquid oxidants, thermodynamic parameters were calculated [15].

Analysis of the results of thermodynamic calculations ΔH° indicates the principle possibility of the process of oxidation of nitrogen oxides by liquid oxidants. The greater the numerical value of the equilibrium constant and the decrease in enthalpy, the more complete the reaction can proceed in the forward direction. Large values of equilibrium constants allow us to conclude that these reactions proceed almost to the end.

Experimental determination of the rate of oxidation and absorption of nitrogen oxides was carried out on a mechanized experimental setup [16]. In contrast to oxidation in the gas phase, the rate of oxidation by liquid oxidizers also increases with increasing temperature. The positive temperature coefficient of the reaction is explained by the fact that during the oxidation of NO in the liquid phase, the intermediate reaction of formation of dimer N_2O_2 does not occur, which with increasing temperature shifts to the left, towards the decomposition of N_2O_2 and controls the overall process of oxidation of NO.

An important role is played by the fact that the rate of decomposition of liquid oxidants increases with increasing temperature, with the release of atomic oxygen and active oxygen-containing ions or radicals, which oxidize nitrogen oxide at a high rate. The high oxidizing power of atomic oxygen, oxygen-containing radicals and ions is observed only at the time of release, after which they lose their activity. Here it should be taken into account that some oxidation reactions with liquid oxidants proceed quite quickly even at room temperature. An increase in temperature in this case leads to rapid decomposition of the oxidizer. The released atomic oxygen and other active compounds do not have time to react with nitrogen oxide in the liquid phase, and, passing into the gas phase, lose their activity.

On the basis of studies conducted under standard conditions, a range of activity of six liquid oxidizers has been established, which decreases in the following sequence:

$$KBrO_3 > KMnO_4 > H_2O_2 > Na_2CrO_4 > (NH_4)_2Cr_2O_7 > K_2Cr_2O_7.$$

The reaction rate coefficients for aqueous solutions with a mass fraction of oxidizing agents of 3 % respectively have the following values, mol/(dm³ · s):

$$620 \cdot 10^{-6} > 365 \cdot 10^{-6} > 338 \cdot 10^{-6} > 204 \cdot 10^{-6} > 60 \cdot 10^{-6} > 30 \cdot 10^{-6}.$$

The oxidizing power of oxidizers differs significantly. An aqueous solution of potassium bromate ($KBrO_3$) turned out to be the most active of the tested oxidants in relation to NO.The effect of the concentration, temperature, and pH of the medium on the rate of oxidation by liquid oxidizing agents of nitrogen oxide (II) was studied. Research was conducted by the method of a full factorial experiment.

As a result of the processing of experimental data, equations describing the rate of oxidation of NO by liquid oxidizers depending on the concentration of solutions, temperature, and pH of the medium were obtained. These equations have the form:

– for potassium bromate $KBrO_3$

$$U_{KBrO_3} = -\left[432{,}65 + 76{,}25C_{KBrO_3} - 4{,}437t + 4{,}17\,pH\right]\cdot 10^{-6} \text{ mol/(dm}^3 \cdot \text{s)};$$

– for potassium permanganate $KMnO_4$

$$U_{KMnO_4} = \left[137{,}5 + 64{,}75C_{KMnO_4} + 1{,}137t + 2{,}833\,pH\right]\cdot 10^{-6} \text{ mol/(dm}^3 \cdot \text{s)}$$

– for hydrogen peroxide H_2O_2

$$U_{H_2O_2} = \left[29{,}99 + 176{,}25C_{H_2O_2} + 183{,}75t + 69{,}99\,pH\right]\cdot 10^{-6} \text{ mol/(dm}^3 \cdot \text{s)}$$

Thermal methods. One of the effective methods of neutralizing nitrous gases is the decomposition of nitrogen oxides. The difficulty of implementing this reaction lies in the necessity of heating the gas mixture. Theoretical studies and technical and economic calculations were carried out for low-power systems with a high content of nitrogen oxides in the exhaust gases. Using thermal methods, nitrogen oxides can be decomposed into harmless substances N_2 and O_2. This method is characterized by simplicity, compactness, insignificant capital and operating costs.

Oxygen compounds of nitrogen can exist in the form of the following oxides: nitrogen oxide (I) N_2O, nitrogen oxide (II) NO, nitrogen oxide (IV) NO_2, nitrogen oxide (III) N_2O_3, nitrogen oxide dimer (IV) N_2O_4, nitrogen oxide (V) N_2O_5. There are also unstable compounds – nitrosylazide N_4O, trinitramide $N(NO_2)_3$ and nitrate radical NO_3^-. Depending on the valence of nitrogen, its oxygen compounds have different compositions and, accordingly, different physical and chemical properties. So, for example, the dimer of nitrogen oxide (IV) is an active substance that reacts with almost all organic and inorganic compounds, while nitrogen oxide (II) is a weakly active substance. The degree of oxidation of nitrogen in the above-mentioned compounds is largely determined by temperature. Depending on the temperature, different nitrogen oxides can exist. In the presence of an oxidizer (oxygen or ozone) and a low temperature, the oxidation reaction of nitrogen oxide (II) proceeds spontaneously and irreversibly in the following direction: $NO + NO_2 \rightarrow N_2O_4 \rightarrow N_2O_5$.

Nitrogen oxide (V) can exist in a solid state even at low temperatures. Solid N_2O_5 in its stable form is nitronium nitrate (NO_2NO_3). When heated in gaseous form, it decomposes into NO_2^+ and NO_3^-. NO_3^- – is easily oxidized, giving off an oxygen atom. Nitric oxide (IV) easily dimerizes by the reversible reaction: $2NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$.

The degree of polymerization also depends on the temperature. Already at a temperature of 21.15 °C, liquid N_2O_4 decomposes into NO_2 molecules. And at a temperature above 140 °C, the reaction completely shifts to the right and

only NO_2 can exist in the gas phase. Upon further heating of nitrogen oxide (IV), it decomposes: $2NO_2 \rightleftarrows 2\ NO + O_2$. Complete decomposition of nitrogen oxide (IV) into nitrogen oxide (II) occurs at a temperature of 600 °C. Nitrogen oxide (II) is quite stable. However, at a temperature above 1000 °C, it decomposes: $2NO \rightleftarrows N_2 + O_2$.

The temperature range of the existence of various nitrogen oxides in the gas phase can be represented by the following diagram:

$$N_2O_4 \xrightarrow{21{,}5-140\ ^\circ C} NO_2 \xrightarrow{150-600\ ^\circ C} NO \xrightarrow{600-1000\ ^\circ C} N_2 + O_2$$

Heating higher nitrogen oxides leads to their decomposition into lower ones. Ultimately, to molecular nitrogen and oxygen. This regularity is the basis of the developed method of thermal decomposition of nitrogen oxides. The reaction of formation and decomposition of nitrogen oxide (II) is reversible:

$$2N_2 + O_2 \rightleftarrows 2NO - 43140 \text{ cal } (179.9 \text{ J}).$$

From the point of view of the neutralization of nitrous gases, the final equilibrium concentration of nitrogen oxides, which is reached by simple thermal decomposition, is too high, and the time to establish the equilibrium concentration in the region of low temperatures is too large. By heating nitrous gas to a temperature of 2000 °C, it is possible to reduce the concentration of nitrogen oxides to 1.34 %. This process takes just 1 second. To reduce the concentration to 0.02 %, it will take time of $4 \cdot 10^5$ s, which is impossible in real conditions, because it will be connected with the installation of a reactor with a volume of about 1000 m^3 per 1 m^3 of nitrous gases. The rate of formation of nitrogen oxides is directly proportional to the content of oxygen in the mixture. If in the process of decomposition of nitrogen oxides, the formed oxygen is removed (bound) from the system, then the rate of formation of nitrogen oxides and the equilibrium concentration can be reduced. This property is used in the method of thermal decomposition of nitrogen oxides. Gaseous, liquid, and solid reducing agents can be used as components that bind oxygen. Such as: hydrogen, carbon monoxide, methane, ammonia, kerosene, gasoline, fuel oil, coke, coal, graphite. The same combustible components are used to heat the gas to the decomposition temperature. They studied the process of thermal decomposition of nitrogen oxides in the temperature range from 500 °C to 5000 °C [17]. To achieve such temperatures, an arc plasmatron with a power of 20 kW was used with a tungsten cathode and a copper anode, which were cooled by running water. Nitrogen oxides, the amount of which corresponded to the given concentration of NO in the gas mixture, were injected into the operating plasmatron. The mixture was heated to a temperature of 2000–4000 °C. At such a temperature, oxides decompose into nitrogen and oxygen molecules. The initial concentration of nitrogen oxides in these experiments ranged from 0.001 % to 10 %, and the average temperature in the reactor was 2000 ÷ 2100 °C. The temperature in the reactor was determined by calculation based on the heat balance of the plasmatron. As the concentration of nitrogen oxides increases, the degree of their decomposition increases. So, for example, with an initial concentration of nitrogen oxides N_xO_y the gas mixture of 5 %, the degree of decomposition was 52 %. When the initial concentration of nitrogen oxides increased from 5 % to 10 %, the degree of their decomposition increased to 77 %. At the same time, the concentration of N_xO_y the outlet remained at the level of 2.4 %.

Oxidation of nitrogen oxides in the presence of low-temperature catalysts. It is known that the rate of oxidation of nitrogen oxide by gaseous oxygen increases in the presence of some solid catalysts. Catalysts prepared on the basis of precious metals show the greatest activity. The catalytic properties of natural and artificial materials were investigated with the aim of using them in industry to increase the rate of NO oxidation. Research was carried out at a facility consisting of two reactors: a reactor for the oxidation of NO and a reactor for the absorption of nitrogen oxides. Based on the amount of absorbed nitrogen oxide, it is possible to state the degree of oxidation of NO, assuming that the degree of absorption is directly proportional to the degree of oxidation of the gas. When studying the influence of catalysts on the oxidation of nitrogen oxides, it was revealed that the conditions of the process significantly affect the speed. The parameters were changed within the following limits: NO concentration ($C_{NO} = 1 \div 2.25$ %); concentration of O_2 ($C_{O_2} = 5 \div 20$ %); contact time ($\tau = 0.52 \div 1.26$ s); temperature t (26 ÷ 30 °C); the initial degree of oxidation of NO ($d_o = 25$ %).

As catalysts, large-porous and small-porous silica gel, vanadium catalyst, hopkalite on a ceramic carrier, manganese oxide (IV) MnO_2, aluminogel, carboaluminogel, catalysts NTK-4, GIAP-10, coke, charcoal from apricot pits and a number of catalysts obtained by impregnation of coke with catalytically active substances. It was found that some catalysts are able to increase the rate of the heterogeneous oxidation reaction by 1.5–2.5 times. The reaction of heterogeneous catalytic oxidation of nitrogen oxide has a positive temperature coefficient, which is due to the manifestation of increased catalytic activity of catalysts with increasing temperature. Of all the tested catalysts for NO oxidation, the most effective were: hopkalite, which increased the degree of absorption of nitrogen oxides by 2.51 times, carboaluminum gel by 1.91 times, silica gel by 1.46 times, coal (from apricot pits) by 1.31 times, and coke by 1.17 times [16].

With more complete studies of hopcalite, it was found that its significant catalytic activity is manifested already at a temperature of 50 °C. Increasing the temperature above 80–100 °C is impractical due to the large amount of heat required to heat the gas and its subsequent cooling before absorption. With the growth of gas volume velocity, the amount of

oxidized NO decreases. This is due to a decrease in the residence time of NO in the catalysis zone. With an increase in the concentration of O_2 and NO, an increase in the rate of oxidation is observed.

Increasing the degree of oxidation of NO by adding nitrogen oxide (IV) gas. Nitrous oxide (III) obtained in this way can be absorbed by one of the known methods.

To increase the degree of oxidation of NO from α_1 to α_2, it is necessary to introduce nitrogen oxide (IV), the amount of which can be determined from the equation:

$$\Delta V_{NO_2} = \frac{V_r \cdot C_r}{100}\left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{1-\alpha_2}\right) \text{m}^3/\text{h},$$

where V_r and C_r are, respectively, the quantity (m^3/h) and concentration of the initial gas mixture (%).

The concentration of gas after dosing NO_2 and depending on the required degree of oxidation of the gas will $C_r' = C_r\left(\frac{1-\alpha_1}{1-\alpha_2}\right)$. This method of NO_2 dosing is acceptable only for systems with a low initial gas concentration (0.1–0.5 %) and a low degree of NO oxidation. Economically, it is more favorable than the method of oxidation of NO to N_2O_3 in oxidizing devices.

Conclusions

The processes of oxidation of nitrogen oxide (II) by liquid, solid and gaseous oxidants were studied. The influence of various parameters on oxidation processes was investigated. It has been proven that an increase in temperature accelerates oxidation processes in the liquid phase in contrast to oxidation in the gas phase. It was established that by introducing gaseous reducing agents, the reaction of high-temperature decomposition of nitrogen oxides can be shifted to the side of their disintegration into simple harmless components. It is determined that the reaction of heterogeneous catalytic oxidation of nitrogen oxide has a positive temperature coefficient. Catalysts are proposed that can increase the reaction rate by 1.5–2.5 times.

A systematic classification of existing and new methods of sanitary purification of atmospheric air from nitrogen oxides has been developed. These cleaning methods can be used in the nitric acid industry, especially when operating large units, to achieve MPC standards in the surface layer of the atmosphere.

Bibliography

1. Бєкєтов В. Є., Євтухова Г. П. Джерела та процеси забруднення атмосфери. Харків : ХНУМГ ім. О. Н. Бекетова, 2019. 113 с.

2. Наказ МОЗ України від 05.08.2021 № 1657 «Про затвердження Змін до Гігієнічних регламентів гранично допустимої концентрації та орієнтовно безпечних рівнів впливу хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1249-21#Text (дата звернення: 22.01.2025).

3. Наказ МОЗ України від 09.07.2024 № 1192 «Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони». URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text (дата звернення: 22.01.2025).

4. Разанов С. Ф., Ткачук О. П. Порівняльний аналіз викидів забруднюючих речовин у повітря традиційними енергоносіями та різними видами біопалива / Сільське господарство та лісівництво. 2015. № 1. С. 152–160.

5. Emissions of air pollutants in the UK – Nitrogen oxides (NO_x). Accredited official statistics. Updated 19 February 2024. URL: https://www.gov.uk/government/statistics/emissions-of-air-pollutants/emissions-of-air-pollutants-in-the-uk-nitrogen-oxides-nox. (дата звернення: 22.01.2025).

6. Debbie J. Jarvis, Gary Adamkiewicz, Marie-Eve Heroux, Regula Rapp, and Frank J. Kelly. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. Nitrogen dioxide. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK138707/. (дата звернення: 22.01.2025).

7. Крусір Г. В., Мадані М. М., Гаркович О. Л. Техніка та технології очищення газових викидів. Одеса : ОНАХТОдеса, 2017. 207 с.

8. Промислові технології та очищення технологічних і вентиляційних викидів: навч. посіб. / Ю. С. Юркевич, О. Т. Возняк, В. М. Желих ; МОНМС України, НУ «Львівська Політехніка». 2012. 120 с.

9. Вязовик В. М., Коржик Л. В., Столяренко Г. С. Технології очищення газів. Черкаси : Вертикаль, видавець Кандич С. Г. 2010. 308 с.

10. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Засоби очищення газових викидів. Навчальний посібник. Вінниця : УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. 207 с.

11. Письменный Б. В., Кравченко Л. П., Деримова А. В., Кожура О. В. Сравнительная оценка и поиск новых эффективных технологических схем очистки газовоздушных выбросов от оксидов азота (NO_x). Вопросы химии и химической технологии. 2011. № 6. С. 173–176. https://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2011/6/Pismennij.pdf

12. Пугановський О. В., Шутинський О. Г. Програма розрахунку процесу абсорбції у виробництві нітратної кислоти № 3 (2024): Інтегровані технології та енергозбереження. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.3.09

13. Пугановський О. В., Подустов М. О., Букатенко О. І., Литвиненко Є. І., Горбунова О. В. Проблеми автоматизації виробництва нітратної кислоти. № 2 (2018): Інтегровані технології та енергозбереження. С. 38–42. http://library.kpi.kharkov.ua/files/JUR/ite_2018_2.pdf

14. Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina E. S. Oxidation of nitrogen oxides by oxygen in the liquid phase. Visnyk KNTU, 2023. № 3(86). P. 27–32.

15. Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina E. S. Efficiency of liquid oxidizers for purification of industrial waste gases from nitrogen oxides // Visnyk KNTU, 2023, № 4(87). С. 70–76.

16. Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Chaban V. O. Oxidation of nitrogen oxides in the presence oflow-temperature catalysts // Visnyk KNTU, 2024, № 4(91).

17. Kuznietsov S. I., Kachuk D. S., Venger O. O., Ivkina E. S. Method of neutralization of nitrogen oxides in area of low-temperature plasma. // Питання хімії та хімічної технології. Дніпро : 2024. № 2(153). С. 32–39. http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-32-38.

References

1. Beketov, V. E., & Yevtukhova, H. P. (2019). Dzherela ta protsesy zabrudnennia atmosfery [Sources and processes of atmospheric pollution]. Kharkiv : KhNUMH im. O. N. Beketova. [in Ukrainian].

2. Nakaz MOZ Ukrainy № 1657 vid 05.08.2021. Pro zatverdzhennya Zmin do Hihiyenichnykh rehlamentiv hranychno dopustymoyi kontsentratsiyi ta oriyentovno bezpechnykh rivniv vplyvu khimichnykh i biolohichnykh rechovyn v atmosfernomu povitri naselenykh mists. [Order of the Ministry of Health of Ukraine № 1657 dated 05.08.2021. On the approval of the Amendments to the Hygienic Regulations on the maximum permissible concentration and tentatively safe levels of exposure to chemical and biological substances in the atmospheric air of populated areas] data zvernennia: 22.01.2024 Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1249-21#Text [in Ukrainian].

3. Nakaz MOZ Ukrainy № 1192 vid 09.07.2024. Pro zatverdzhennya derzhavnykh medyko-sanitarnykh normatyviv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rechovyn u povitri robochoyi zony. [Order of the Ministry of Health of Ukraine № 1192 dated 09.07.2024. On the approval of the state medical and sanitary standards for the permissible content of chemical and biological substances in the air of the working area] data zvernennia: 22.01.2024 Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text. [in Ukrainian].

4. Razanov, S. F., & Tkachuk, O. P. (2015) Porivnialnyi analiz vykydiv zabrudniuiuchykh rechovyn u povitria tradytsiinymy enerhonosiiamy ta riznymy vydamy biopalyva [Comparative analysis of emissions of pollutants into the air by traditional energy carriers and different types of biofuels] Silske hospodarstvo ta lisivnytstvo, 1, 152–160 [in Ukrainian].

5. Emissions of air pollutants in the UK – Nitrogen oxides (NOx). Accredited official statistics. Updated 19 February 2024. Retrieved from https://www.gov.uk/government/statistics/emissions-of-air-pollutants/emissions-of-air-pollutants-in-the-uk-nitrogen-oxides-nox (data zvernennia: 22.01.2025).

6. Debbie J. Jarvis, Gary Adamkiewicz, Marie-Eve Heroux, Regula Rapp, and Frank J. Kelly. WHO Guidelines for Indoor Air Quality: Selected Pollutants. Nitrogen dioxide. Retrieved from https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK138707/ (data zvernennia: 22.01.2025).

7. Krusir, H. V., Madani, M. M., & Harkovych, O. L. (2017). Tekhnika ta tekhnolohii ochyshchennia hazovykh vykydiv [Techniques and technologies for cleaning gas emissions]. Odesa: ONAKhT-Odesa [in Ukrainian].

8. Yurkevych, Yu. S., Vozniak, O. T., & Zhelykh V. M. (2012). Promyslovi tekhnolohii ta ochyshchennia tekhnolohichnykh i ventyliatsiinykh vykydiv [Industrial technologies and cleaning of technological and ventilation emissions] MONMS Ukrainy, NU “Lvivska Politekhnika” [in Ukrainian].

9. Viazovyk, V. M., Korzhyk, L. V., & Stoliarenko, H. S. (2010). Tekhnolohii ochyshchennia haziv [Gas purification technologies]. – Cherkasy: Vertykal, vydavets Kandych S. H. [in Ukrainian].

10. Ratushniak, H. S., & Lialiuk, O. H. (2008). Zasoby ochyshchennia hazovykh vykydiv [Means for cleaning gas emissions]. Vinnytsia : UNIVERSUM–Vinnytsia [in Ukrainian].

11. Pis’mennyy B. V., Kravchenko L. P., Derimova A. V., Kozhura O. V. (2011). Sravnitel’naya otsenka i poisk novykh effektivnykh tekhnologicheskikh skhem ochistki gazovozdushnykh vybrosov ot oksidov azota (NO_x) [Comparative assessment and search for new effective technological schemes for purifying gas-air emissions from nitrogen oxides (NO_x)]. Pytannya khimiyi ta khimichnoyi tekhnolohiyi. № 6. P. 173–176 [in Ukrainian]. https://udhtu.edu.ua/public/userfiles/file/VHHT/2011/6/Pismennij.pdf

12. Puhanovs′kyy O. V., Shutyns′kyy O. H. (2024). Prohrama rozrakhunku protsesu absorbtsiyi u vyrobnytstvi nitratnoyi kysloty. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. № 3 DOI: https://doi.org/10.20998/2078-5364.2024.3.09. [in Ukrainian].

13. Problemy avtomatyzatsii vyrobnytstva nitratnoi kysloty / [O. V. Puhanovskyi, M. O. Podustov, O. I. Bukatenko ta in.]. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. 2018. № 2. P. 38–42 [in Ukrainian].

14. Kuznietsov S. I., Venher O. A., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina E. S. Oxidation of nitrogen oxides by oxygen in the liquid phase. Visnyk KNTU, 2023. № 3(86). P. 27–32.

15. Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina E. S. Efficiency of liquid oxidizers for purification of industrial waste gases from nitrogen oxides. Visnyk KNTU, 2023, № 4(87). P. 70–76.

16. Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Chaban V. O. Oxidation of nitrogen oxides in the presence oflow-temperature catalysts. Visnyk KNTU, 2024, № 4(91).

17. Kuznietsov S. I., Kachuk D. S., Venger O. O., Ivkina E. S. (2024). Method of neutralization of nitrogen oxides in area of low-temperature plasma. Pytannya khimiyi ta khimichnoyi tekhnolohiyi. № 2(153). P. 32–39. http://dx.doi.org/10.32434/0321-4095-2024-153-2-32-38

УДК 519.854.3:656.13 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.14

О. Ф. КУЗЬКІН
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри «Транспортні технології»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-3160-1285

І. М. РАЙДА
старший викладач кафедри «Транспортні технології»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-3925-4692

В. Е. ТРУШЕВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Транспортні технології»
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-5966-259X

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОНТАКТІВ ПАСАЖИРІВ ГРОМАДСЬКОГО ТРАНСПОРТУ НА МІСЬКИХ МАРШРУТАХ

Під час спалаху світової пандемії коронавірусу COVID-19, міський масовий пасажирський транспорт розглядався одним із чинників, що сприяли поширенню інфекції серед населення міст. Переміщуючись у обмеженому просторі та об'ємі салону громадського транспорту, пасажири контактують один з одним безпосередньо, або опосередковано, через контактні поверхні елементів салону, що створює сприятливі умови для передачі захворювання від хворої до здорової людини. Намагаючись зменшити ризики захворювання пасажирів, місцеві органи влади та транспортні оператори запроваджували різноманітні обмеження щодо доступу пасажирів до послуг громадського транспорту – від обмеження максимальної кількості пасажирів у салоні до повного припинення обслуговування пасажирів на окремих міських маршрутах. Однак, ефективність цих заходів та їх вплив на поширення інфекції залишається не з'ясованою.

Стаття присвячена статистичному аналізу показників контактів пасажирів між собою під час користування послугами міського громадського транспорту з метою їх кількісної оцінки для використання у моделях ризиків захворювання пасажирів та імовірнісних моделях поширення інфекцій, а також обґрунтування ефективності запровадження організаційно-технологічних заходів щодо користування громадським транспортом під час пандемій та епідемій. На підставі результатів обстеження пасажирських потоків на чотирьох автобусних маршрутах міста Запоріжжя з рухомим складом різної пасажиромісткості, виконаних табличним методом, та моделювання на їх основі рейсової матриці міжзупинкових пасажирських кореспонденцій встановлено статистичні закономірності залежності кількості контактів пасажирів між собою та середньої кількості контактів одного пасажира під час поїздки від обсягу перевезень на маршрутах за рейс. Встановлено, що випадкова величина середньої кількості контактів пасажира, віднесена до пасажиромісткості рухомого складу, задовільно описується законом гамма-розподілу, отримані основні статистики і параметри гамма-розподілу цієї випадкової величини.

Ключові слова: *громадський транспорт, контакти пасажирів, інфекційні захворювання, статистичний аналіз.*

O. F. KUZKIN
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Transport Technologies
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0002-3160-1285

I. M. RAIDA
Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0003-3925-4692

V. E. TRUSHEVSKYI
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
National University Zaporizhzhia Polytechnic
ORCID: 0000-0002-5966-259X

STATISTICAL ANALYSIS OF PUBLIC TRANSPORT PASSENGER CONTACTS ON URBAN ROUTES

During the outbreak of the global COVID-19 coronavirus pandemic, urban mass passenger transport was considered one of the factors contributing to the spread of infection among the urban population. Moving in the limited space and volume of public transport cabins, passengers come into contact with each other directly or indirectly through the contact surfaces of cabin elements, which creates favorable conditions for the transmission of the disease from a sick person to a healthy person. In an attempt to reduce the risk of passenger disease, local authorities and transport operators have introduced various restrictions on passenger access to public transport services – from limiting the maximum number of passengers in the cabin to completely stopping passenger services on certain city routes. However, the effectiveness of these measures and their impact on the spread of infection remains unclear.

The article is devoted to the statistical analysis of the indicators of passenger contacts among themselves while using the services of urban public transport in order to quantify them for use in passenger disease risk models and probabilistic models of the spread of infections, as well as to substantiate the effectiveness of the introduction of organizational and technological measures for the use of public transport during pandemics and epidemics. Based on the results of the survey of passenger flows on four bus routes of the city of Zaporizhzhia with rolling stock of different passenger capacity, performed by the tabular method, and modeling on their basis the route matrix of inter-stop passenger correspondences, statistical patterns of the dependence of the number of passenger contacts among themselves and the average number of contacts of one passenger during the trip on the volume of transportation on the routes per trip were established. It was established that the random variable of the average number of passenger contacts, attributed to the passenger capacity of the rolling stock, is satisfactorily described by the gamma distribution law, the main statistics and parameters of the gamma distribution of this random variable were obtained.

Key words: *public transport, passenger contacts, infectious diseases, statistical analysis.*

Постановка проблеми

Розгалужена мережа міського пасажирського транспорту є невід'ємною частиною будь-якого великого міста. Роль міського пасажирського транспорту, який забезпечує належний рівень мобільності його мешканців, зростає зі зростанням чисельності населення та площі міста, разом з цим зростає складність задач з планування, організації та управління ним. Складність таких задач значно підвищується у разі настання надзвичайних ситуацій, до яких можна віднести і виникнення епідемій і пандемій.

В умовах постійної епідемічної загрози перед організаторами регулярних пасажирських перевезень постає проблема вирішення низки особливих та нетривіальних задач: від необхідності організації підготовки рухомого складу до перевезень, яка повинна включати його санітарну обробку, до запровадження управлінських дій щодо процесу організації перевезень з метою зниження ризику поширення інфекцій та зараження пасажирів під час користування громадським транспортом.

Виходячи з рекомендації закладів та організацій охорони здоров'я, з метою зниження ризику захворювання та розповсюдження інфекцій під час епідемій та пандемій бажано уникати будь-яких великих скупчень людей. У цьому контексті масовий міський громадський транспорт, технологія роботи якого полягає у переміщенні великої кількості людей в обмеженому за площею та об'ємом рухомому складі, може розглядатися як потенційно небезпечне середовище для людини.

З метою зниження потенційних ризиків захворювання та поширення інфекції серед користувачів громадського транспорту під час останнього спалаху пандемії коронавірусу Covid-19 у різних країнах світу на різних рівнях – від державного до рівня транспортних операторів, було застосовано низку управлінських рішень щодо запровадження контролю та обмеження рівня наповнення пасажирського рухомого складу [1-3], закриття окремих маршрутів [2], застосування технічних пристроїв з недопущення до користування громадським транспортом особам з симптомами захворювання [4]. Кожен з цих заходів пов'язаний з певними, іноді значними, економічними втратами – як прямими, пов'язаними з запровадженням та експлуатацією технічних пристроїв та зниженням провізної здатності пасажирського рухомого складу, так і опосередкованими, пов'язаними з наслідками зниження рівня мобільності населення та можливого переключення потенційних пасажирів на використання засобів індивідуального моторизованого транспорту. Втім, на даний час, ступінь впливу подібних заходів на темпи поширення інфекцій та ризик захворювання користувачів громадського транспорту під час пандемій залишається до кінця не з'ясованою.

Під час користування масовим міським громадським транспортом пасажири контактують один з одним, що створює умови для розповсюдження інфекцій, механізм передавання яких від хворої до здорової людини є аерогенним (зокрема, повітряно-крапельним) або контактним (як при безпосередньому контакті пасажирів один з одним. так і опосередковано через контактні поверхні салону пасажирського рухомого складу – двері, поручні, ручки тощо).

Таким чином можна висловити припущення, що одним з факторів, що визначають ступінь поширення інфекцій та ризику захворювання пасажирів громадського транспорту, є кількість контактів пасажирів між собою під час здійснення поїздки. У даній роботі досліджено закономірності змінювання величини кількості контактів пасажирів громадського транспорту під час поїздок від техніко-експлуатаційних та результативних показників міських маршрутів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Світова пандемія коронавірусу Covid-19, яка за відносно короткий термін, забрала життя більше 7 мільйонів мешканців планети Земля [5], змінила ставлення до управління міським масовим громадським транспортом в умовах кризових ситуацій. Особи, дотичні до процесів організації та управління такою складною системою, як міський пасажирський транспорт – рядові інженери, керівники транспортних підрозділів, транспортні оператори, представники місцевих органів влади та спільнота науковців, – повинні бути готовими до швидкого та обґрунтованого прийняття управлінських рішень у випадку виникнення подібних до епідемії коронавірусу ситуаціях. При цьому такі рішення мають бути зваженими та ефективними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, бурхливе зростання кількості яких відбулось через останню пандемію коронавірусу Covid-19, свідчить, що роль міського масового громадського транспорту (ГТ) у розповсюдженні інфекції на урбанізованій території досі залишається невизначеною. Більшість дослідників визначають ГТ як один важливих факторів, що сприяє поширенню інфекції серед населення [2, 6, 7]. Однак, на думку деяких дослідників, ГТ не є ключовим фактором у розповсюдженні інфекцій [8], або взагалі сприяє зменшенню їх поширення [9].

Більшість науковців у своїх дослідженнях використовують в якості фактору, що кількісно визначає ризик поширення інфекції між пасажирами ГТ та ступінь ризику захворювання пасажира, кількість контактів пасажирів між собою під час поїздки [2–4, 7, 8]. Зростання кількості таких контактів збільшує потенційних ризик захворювання пасажирів, що є цілком логічним. Отримання фактичних даних про кількість контактів пасажирів під час користування ГТ у містах є доволі трудомісткою задачею, пов'язаною під час пандемій з ризиками захворювання і самих дослідників, тому у попередніх дослідженнях науковців здебільшого використовувались історичні дані автоматизованих систем обліку пасажирів та збирання оплати за проїзд. На підставі цих даних виконувалось моделювання пасажирських кореспонденцій, формування та дослідження мереж контактів пасажирів ГТ [2, 3, 7, 10].

Практичні працівники ГТ у своїй повсякденній професійній діяльності оперують не медичними чи епідеміологічними категоріями, а виробленими та перевіреними часом науково обґрунтованими підходами та методиками транспортної галузі. З цієї точки зору потребують дослідження статистичні закономірності величини кількості контактів пасажирів між собою як фактору ризику поширення інфекційних захворювань під час епідемій та пандемій.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є статистичний аналіз величини кількості контактів пасажирів між собою під час користування міським ГТ на рівні окремих рейсів міського масового маршрутного транспорту загального користування.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для цілей даного дослідження будемо вважати, що два пасажири під час поїздки громадським транспортом мали між собою контакт у разі, якщо вони одночасно перебували у салоні транспортного засобу під час виконання останнім рейсу на окремому міському маршруті. При цьому місцями фактичного розташування пасажирів у салоні та величиною фізичної відстані між ними знехтуємо. Таке припущення є цілком прийнятним, оскільки замкнений внутрішній простір салону автобуса та велика кількість його контактних поверхонь є сприятливими умовами для інфекцій, які розповсюджуються повітряно-крапельним або контактним шляхом.

Контактом пари пасажирів будемо називати подію, яка полягає у тому, що ці два пасажири одночасно перебувати у салоні під час поїздки. Кількість контактів усіх пар пасажирів, які фактично скористалися маршрутним транспортним засобом за рейс позначимо як . Кількість контактів окремого пасажира визначимо як загальну кількість пасажирів, з якими цей пасажир мав контакт під час здійснення поїздки від зупинки посадки до зупинки виходу.

Розглянемо рейс пасажирського транспортного засобу (ТЗ) на маршруті ГТ, що складається з зупинок, пронумерованих порядковими числами 1, 2, …, N. Нехай нам відома кількість пасажирів, що увійшли до салону ТЗ a_i $(i = \overline{1, N})$ та вийшли з нього b_j $(j = \overline{1, N})$ на кожній зупинці маршруту, при цьому, очевидно, $a_N = b_0 = 0$ та $\sum_{i=1}^{N} a_i = \sum_{j=1}^{N} b_j = Q,$ де Q – обсяг перевезень пасажирів за рейс. Така інформація може бути отримана за даними систем автоматизованого продажу квитків або на підставі натурних обстежень безпосередньо у салоні ТЗ або на зупинках ГТ. Пасажир, який увійшов до ТЗ на зупинці $m \in [0, N-1]$ та вийшов з ТЗ на зупинці $(n \in [1, N], n > m)$ під час поїздки мав контакти з усіма пасажирами, які увійшли до ТЗ разом з ним та на усіх наступних проміжних зупинках до зупинки виходу виключно, тобто кількість контактів цього пасажира під час поїздки може бути визначена як

$$k_{mn} = \sum_{i=m}^{n-1} a_i. \qquad (3)$$

Вичерпну інформацію про зупинки входу та виходу пасажирів містить рейсова матриця міжзупинкових пасажирських кореспонденцій X, елементи якої x_{ij} $(x, j \in [1, N], j > i)$ дорівнюють кількості пасажирів, що вийшли з ТЗ на зупинці j з усіх пасажирів, що увійшли до ТЗ на зупинці i. Така матриця для кожного рейсу може бути отримана безпосередньо (у разі використання даних систем автоматизованого обліку пасажирів з фіксацією зупинок входу

та виходу пасажирів) або шляхом моделювання пасажирських кореспонденцій за відомими значеннями a_i та b_j для усіх зупинок маршруту [11].

Знаючи кількість контактів кожного окремого пасажира $k_{mn}^{(i)}$ $(i=\overline{1,Q})$ можна розрахувати значення середньої кількості контактів одного пасажира $\overline{k}$ та загальної кількості контактів пасажирів за рейс E за формулами

$$\overline{k}=\frac{1}{Q}\sum_{i=1}^{Q}k_{mn}^{(i)},\quad m,n\in[1,N]; \tag{4}$$

$$E=\frac{1}{2}\cdot\overline{k}\cdot Q. \tag{5}$$

Для дослідження було обрано чотири маршрути міського автобуса міста Запоріжжя (№ 65, № 89, № 55 та № 17). Загальна характеристика досліджуваних маршрутів наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика досліджуваних маршрутів

Характеристика	Значення характеристики для маршруту			
	№ 65 (1)	№ 89 (2)	№ 55 (3)	№ 17 (4)
1. Довжина маршруту, км	8,05	15,1	22,5	26,7
2. Кількість зупинок за напрямками руху (прямий/зворотний)	13/12	25/27	33/34	41/40
3. Пасажиромісткість рухомого складу, пас.	22	30	40	100
4. Кількість досліджених рейсів	96	52	31	34

На кожному з маршрутів було проведено обстеження пасажиропотоків протягом одного буднього дня тижня табличним методом (з підрахунком кількості пасажирів, що увійшли та вийшли з автобуса на кожній зупинці маршруту), в результаті загалом було отримано вихідні дані по 213 рейсам.

Основні статистики результативних показників пасажирських перевезень (математичне очікування m_x та стандартне відхилення σ_x обсягу перевезень пасажирів за рейс), отриманих за результатами обстеження по кожній вибірковій сукупності рейсів на досліджуваних маршрутах, наведені у табл. 2. У цій же таблиці наведені основні статистики показників контактів пасажирів E та $\overline{k}$ по цих вибіркових сукупностях, отримані за формулами (3)–(5) за змодельованими матрицями міжзупинкових пасажирських кореспонденцій по кожному обстеженому рейсу.

Таблиця 2

Основні статистики обсягу перевезень та показників контактів пасажирів на досліджуваних маршрутах

Показник	Значення статистик показника по номерам маршрутів							
	№ 65		№ 89		№ 55		№ 17	
	m_x	σ_x	m_x	σ_x	m_x	σ_x	m_x	σ_x
Q, пас.	17,39	9,32	29,71	6,56	41,19	10,39	123,6	48,19
E	181,8	190,4	395,4	186,9	803,4	435,7	4630,0	3377,5
$\overline{k}$	15,98	9,30	25,32	6,43	36,27	11,69	64,39	31,76

На рис. 1 наведені графічні залежності обсягу перевезень пасажирів за рейс Q, кількості контактів пасажирів E та середньої кількості контактів одного пасажира $\overline{k}$ від пасажиромісткості рухомого складу, використовуваного для перевезень q, а також залежність кількості контактів одного пасажира E від обсягу перевезень пасажирів за рейс Q.

Аналіз цих залежностей свідчить, що значення усіх досліджуваних показників зростають зі збільшенням пасажиромісткості рухомого складу, при цьому характер зростання є лінійним для обсягу перевезених пасажирів Q та нелінійним для характеристик контактів пасажирів E та $\overline{k}$. Крім того, загальна кількість контактів пасажирів нелінійно зростає зі збільшенням обсягу перевезень пасажирів за рейс Q.

Зауважимо, що хоча загальна кількість контактів пасажирів E зростає при збільшенні обсягу перевезень пасажирів за рейс Q, між цими величинами теоретично не існує функціональної залежності, оскільки величина E визначається виключно особливостями формування пасажиропотоку на маршруті протягом окремого рейсу, представленими рейсовою матрицею міжзупинкових пасажирських кореспонденцій. При цьому величина Q визначає верхню границю величин E та $\overline{k}$. Дійсно, якщо за певний рейс на маршруті перевезено Q, то максимальне значення кількості контактів пасажирів визначається виразом

$$E_{\max}=\frac{Q\cdot(Q-1)}{2}=\frac{Q^2-Q}{2}, \tag{6}$$

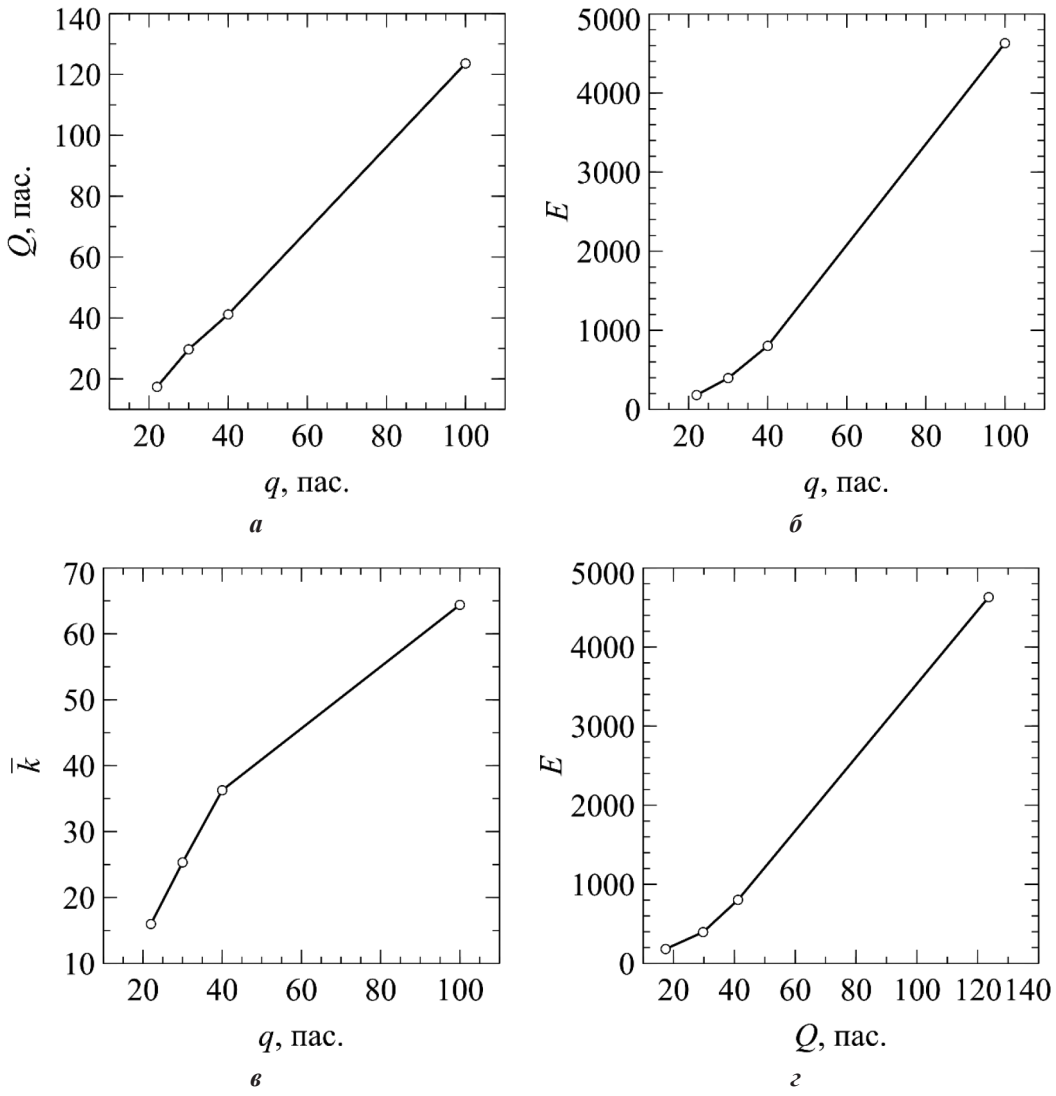


Рис. 1. Залежності *Q* = *f*(*q*) (*а*), *E* = *f*(*q*) (*б*), $\overline{k} = f(q)$ (*в*) та *E* = *f*(*Q*) (*г*)

що відповідає ситуації коли усі перевезені пасажири протягом рейсу контактували один з одним. При збільшенні обсягу перевезень пасажирів маємо практично $E_{\max} \to (1/2) \cdot Q^2$. Очевидно, верхньою границею величини $\overline{k}$ є зменшена на одиницю кількість пасажирів, перевезених за рейс, тобто $\overline{k}_{\max} \to (Q-1)$. Відношення $E/E_{\max} = \overline{k}/\overline{k}_{\max} = \overline{k}/(Q-1)$ є імовірністю того, що два випадково обраних пасажири, які проїхали одним рейсом на маршруті, під час поїздки мали контакт один з одним.

Розглянемо випадкову величину питомої кількості контактів пасажира, яку визначимо як відношення середньої кількості контактів пасажира за рейс до пасажиромісткості рухомого складу, тобто

$$k' = \frac{\overline{k}}{q}. \tag{7}$$

Основні статистики цієї величини k' (математичне очікування m_k, стандартне відхилення σ_k та коефіцієнт варіації ν_k) наведені у таблиці 3.

Статистичний аналіз випадкової величини k' показав, що вона може бути задовільно описана законом гамма-розподілу, функція щільності якого визначається формулою [12]

$$f(x) = \frac{x^{\eta-1}}{\theta^{\eta} \cdot \Gamma(\eta)} \cdot e^{-\frac{x}{\theta}}, \tag{8}$$

де η, θ – відповідно, параметр форми та параметр масштабу розподілу; $\Gamma(x)$ – гамма-функція Ейлера.

Таблиця 3

Основні статистики та параметри закону гамма-розподілу величини k'

Параметр	Значення параметру для маршруту			
	№ 65	№ 89	№ 55	№ 17
1. Математичне очікування m_k	0,726	0,844	0,907	0,644
2. Стандартне відхилення σ_k	0,423	0,214	0,292	0,317
3. Коефіцієнт варіації ν_k	0,582	0,254	0,322	0,492
4. Параметр форми η	2,621	16,01	9,115	3,630
5. Параметр масштабу θ	0,277	0,053	0,099	0,177
6. Імовірність узгодження p^*	0,438	0,525	0,422	0,270

Перевірка гіпотез про закон розподілу виконувалась за критерієм χ^2 Пірсона на рівні значимості $\alpha = 0,05$. Отримані розрахункові значення імовірності узгодження $p^* > 0,05$, тож гіпотеза про прийнятий закон розподілу підтверджується. На рисунку 2 наведені гістограми розподілу, а у таблиці 3 наведені значення параметрів гамма-розподілу величини k' на досліджуваних маршрутах з різною пасажиромісткістю рухомого складу.

Таким чином, результати розрахунків свідчать, що кількість контактів одного пасажира, що припадає на одне місце пасажира у рухомому складі, має математичне очікування $m_k = 0,644…0,907$, коефіцієнт варіації $\nu_k = 0,254…0,582$ та задовільно описується законом гамма-розподілу, параметри форми і масштабу якого коливаються у доволі широких межах. Зауважимо, що отримані значення параметрів форми закону гамма-розподілу

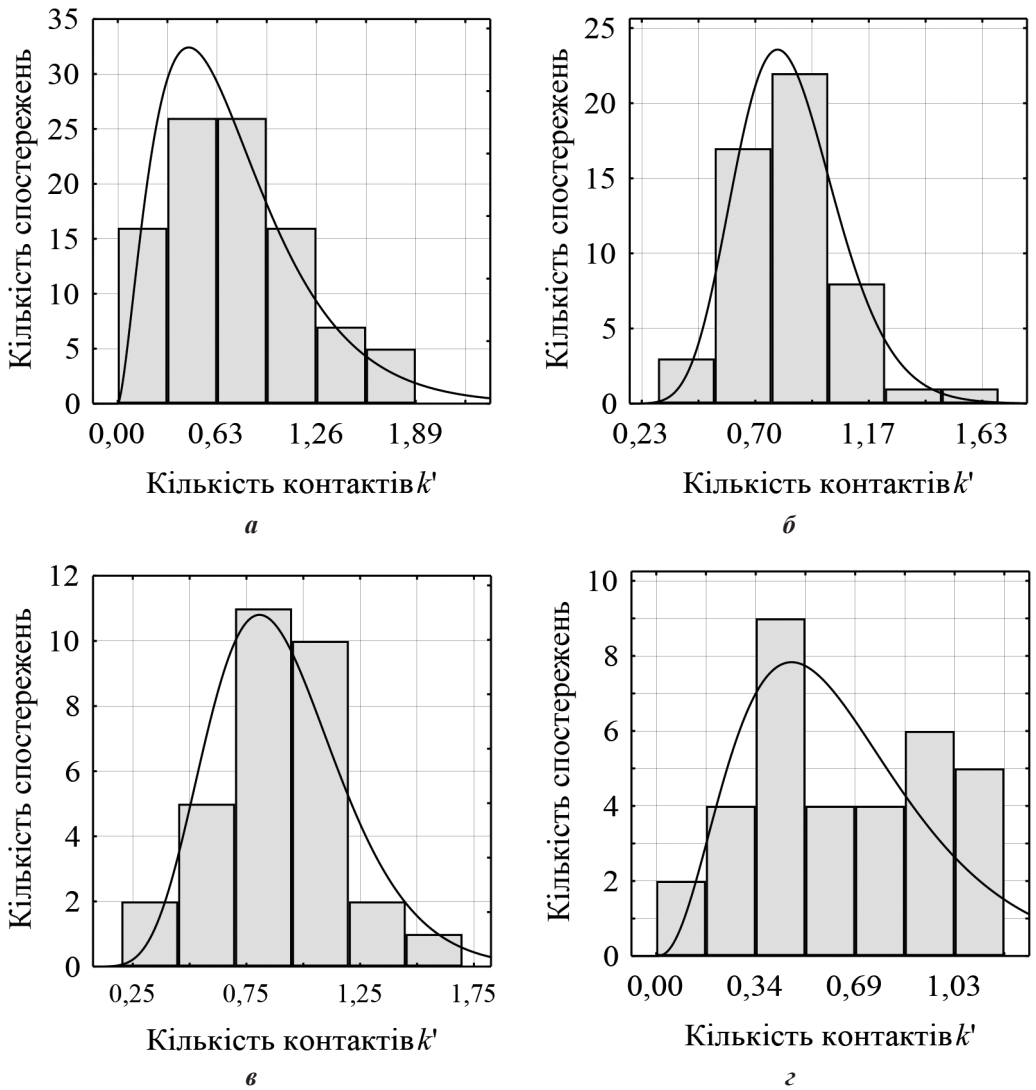


Рис. 2. Гістограми розподілу питомої кількості контактів пасажира для рухомого складу пасажиромісткості q = 22 пас. (*а*), q = 30 пас. (*б*), q = 40 пас. (*в*), q = 100 пас. (*г*)

мають значення, що перевищують $\eta > 2{,}5$, тож випадкова величина k' може бути також описана нормальним розподілом Гауса.

Отримані статистичні закономірності дозволяють виконувати оцінку кількості контактів пасажирів та середньої кількості контактів одного пасажира за рейс при користуванні пасажирів міським громадським транспортом на досліджуваних міських автобусних маршрутах з використанням на них рухомого складу різної пасажиромісткості. Така оцінка дає можливість використовувати отримані числові значення контактів пасажирів на міських маршрутах для моделювання ризиків захворювання пасажирів у імовірнісних моделях поширення інфекцій під час епідемій та пандемій.

Висновки

В результаті проведеного статистичного аналізу величин кількості контактів пасажирів між собою під час користування міським ГТ встановлено, що загальна кількість контактів пасажирів між собою та середня кількість контактів одного пасажира за рейс на міському маршруті нелінійно зростають при збільшенні обсягу перевезень пасажирів за рейс. Встановлено, що випадкова величина середньої кількості контакту одного пасажира, що припадає на одне місце пасажиромісткості рухомого складу на маршруті може бути задовільно описана законом гамма-розподілу. Отримані результати можуть бути використані для оцінки числових параметрів, що характеризують контакти пасажирів громадського транспорту, у імовірнісних моделях поширення інфекцій серед користувачів ГТ під час спалаху епідемій та пандемій.

Список використаної літератури

1. Постанова кабінету міністрів України «Про встановлення карантину та запровадження обмежувальних протиепідемічних заходів з метою запобігання поширенню на території України гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2» від 9 грудня 2020 року № 1236 [Електронний ресурс]. URL: https://ips.ligazakon.net/document/KP201236?an=1&ed=2021_08_18 (дата звернення: 16.01.2025).

2. Mo B., Feng K., Shen Yu, Tam C., Li D., Yin Y., Zhao J. Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, January 2021, Volume 122:102893. doi: https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102893

3. Kumar P., Khani A., Lind E., Levin J. Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data. *Transportation Research Record Journal*, February 2021, Vol. 2675(6). doi: https://doi.org/10.1177/0361198120985133

4. Zhuang Y., Chen Y. Risk management of Covid-19 epidemic spread in urban rail transit based on SEIR model. *Sixth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2021)*, 2021, Chongqing, China. doi: https://doi.org/10.1117/12.2624679

5. COVID-19 Coronavirus Pandemic. World statistics and information portal. [Electronic resource]. URL: https://www.worldometers.info/coronavirus/ (accessed: 22.01.2025).

6. Troko J., Myles P., Gibson J., Hashim A., Enstone J., Kingdon S., Packham C., Amin S., Hayward A., Van-Tam J. Is public transport a risk factor for acute respiratory infection? *BMC Infectious Diseases* 11, article number: 16 (2011). doi: https://doi.org/10.1186/1471-2334-11-16

7. Ku D., Yeon C., Lee S., Lee K., Hwang K., Li Y. C., Wong S. C. Safe traveling in public transport amid COVID-19. *Science Advances*, October 2021, Vol. 7, Issue 43. doi: https://doi.org/10.1126/sciadv.abg3691

8. Qian X., Ukkusuri S. V. Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion. *Cornell University*, May 2020, arXiv: 2005.04583. doi:https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.04583

9. Tapiador L., Gomez J., Vassallo J. M. Exploring the relationship between public transport use and COVID-19 infection: A survey data analysis in Madrid Region. *Sustainable Cities and Society*, May 2024, Volume 104:105279. doi: https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105279

10. Кузькін О. Ф., Райда І. М., Мартинов Д. О. Аналіз мереж контактів пасажирів громадського транспорту для різних типів міських маршрутів – Транспортні технології та безпека дорожнього руху. Збірник тез доповідей П'ятої всеукраїнської науково-практичної конференції 12–13 березня 2024 р., Запоріжжя [Електронний ресурс] – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024, 27–29 с. URL: https://eir.zp.edu.ua/items/001ab204-667a-4205-b4f5-072c4182d0e0

11. Ігнатенко О. С., Маруних В. С. Організація автобусних перевезень у містах. Навчальний посібник. Український транспортний університет. К. : [б.в.], 1998. 193 с.

12. Лащених О. А., Кузькін О. Ф., Грицай С. В. Імовірнісні і статистико-експериментальні методи аналізу транспортних процесів і систем. Навчальний посібник. Запоріжжя, ЗНТУ, 2012. 420 с.

References

1. Postanova kabinetu ministriv Ukrainy "Pro vstanovlennia karantynu ta zaprovadzhennia obmezhuvalnykh protyepidemichnykh zakhodiv z metoiu zapobihannia poshyrenniu na terytorii Ukrainy hostroi respiratornoi khvoroby

COVID-19, sprychynenoi koronavirusom SARS-CoV-2" [Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine "On the establishment of quarantine and the introduction of restrictive anti-epidemic measures to prevent the spread of acute respiratory disease COVID-19, caused by the SARS-CoV-2 coronavirus, in the territory of Ukraine"] (9 December 2020, № 1236) [Electronic resource]. [in Ukrainian].

2. Mo B., Feng K., Shen Yu, Tam C., Li D., Yin Y., Zhao J. (2021) Modeling epidemic spreading through public transit using time-varying encounter network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, January, Volume 122:102893.

3. Kumar P., Khani A., Lind E., Levin J. (2021) Estimation and Mitigation of Epidemic Risk on a Public Transit Route using Automatic Passenger Count Data. *Transportation Research Record Journal*, February, Vol. 2675(6).

4. Zhuang Y., Chen Y. (2021) Risk management of Covid-19 epidemic spread in urban rail transit based on SEIR model. *Sixth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2021)*, Chongqing, China.

5. COVID-19 Coronavirus Pandemic. World statistics and information portal. [Electronic resource].

6. Troko J., Myles P., Gibson J., Hashim A., Enstone J., Kingdon S., Packham C., Amin S., Hayward A., Van-Tam J. (2011) Is public transport a risk factor for acute respiratory infection? *BMC Infectious Diseases* 11, article number: 16.

7. Ku D., Yeon C., Lee S., Lee K., Hwang K., Li Y.C., Wong S.C. (2021) Safe traveling in public transport amid COVID-19. *Science Advances*, October, Vol. 7, Issue 43.

8. Qian X., Ukkusuri S.V. (2020) Modeling the spread of infectious disease in urban areas with travel contagion. *Cornell University*, May, arXiv: 2005.04583.

9. Tapiador L., Gomez J., Vassallo J.M. (2024) Exploring the relationship between public transport use and COVID-19 infection: A survey data analysis in Madrid Region. *Sustainable Cities and Society*, May, Volume 104:105279.

10. Kuzkin O.F., Raida I.M., Martynov D.O. (2024) Analiz merezh kontaktiv pasazhyriv hromadskoho transportu dlia riznykh typiv miskykh marshrutiv [Analysis of public transport passenger contact networks for different types of urban routes]. *Transportni tekhnolohii ta bezpeka dorozhnoho rukhu. Zbirnyk tez dopovidei Piatoi vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii 12–13 bereznia 2024 r., Zaporizhzhia*, 27–29 pp. [Electronic resource]. [in Ukrainian].

11. Ihnatenko O.S., Marunych V.S. (1998) Orhanizatsiia avtobusnykh perevezen u mistakh. [Organization of bus transportation in cities.] Navchalnyi posibnyk. Ukrainskyi transportnyi universytet – K. : [b.v.] – 193 p. [in Ukrainian].

12. Lashchenykh O.A., Kuzkin O.F., Hrytsai S.V. (2012) Imovirnisni i statystyko-eksperymentalni metody analizu transportnykh protsesiv i system. [Probabilistic and statistical-experimental methods of analyzing transport processes and systems.] Navchalnyi posibnyk. – Zaporizhzhia, ZNTU. – 420 p. [in Ukrainian].

УДК 004.94 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.15

О. Б. КУНГУРЦЕВ
кандидат технічних наук, професор,
професор кафедри інженерії програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0000-0002-3207-7315

П. М. ГУЗАР
студент
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0008-2175-5513

Т. О. НОВІКОВА
асистент кафедри інженерії програмного забезпечення
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0004-5755-9275

Т. О. ФЕДЯНІН
студент
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0008-2175-5513

Б. В. ЧЕБАНЕНКО
студент
Національний університет «Одеська політехніка»
ORCID: 0009-0004-5186-2353

КОМП'ЮТЕРНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ГРИ У СНУКЕР І ПІДКАЗОК

Робота спрямована на створення комп'ютерної моделі гри у снукер, яка поряд з імітацією реальної гри проводить аналіз ігрової ситуації та пропонує ефективні способи продовження гри. Показано зростання популярності гри у снукер у всьому світі. Проаналізовано існуючі варіанти комп'ютерних ігор у снукер. Встановлено, що в існуючих моделях гри недостатньо реалізована підтримка гравців-початківців у таких питаннях як посилання на правила в конкретній ситуації, визначення ефективного варіанту продовження гри, вибір точки та напрямку удару по битку тощо. Також немає реалізацій низки варіантів гри, важко визначити ступінь відповідності реальним правилам гри та реальним ситуаціям на ігровому полі. Запропоновано створити комп'ютерну версію гри на базі алгоритмів, що базуються на правилах реальної гри та особливостях, пов'язаних з її комп'ютерною реалізацією. Для підтримки можливих модифікацій програмного забезпечення використано об'єктно-орієнтовану технологію проектування. Створені моделі елементів гри: модель ігрового столу, моделі битка та прицільної кулі, моделі управління грою та управління часом гри. Кожна модель має ряд функцій, які визначають поведінку відповідного об'єкта у певних ситуаціях. Моделі реалізовані у вигляді програмних класів, що дає можливість за необхідності вносити зміни та вдосконалення у програмне забезпечення шляхом наслідування та композиції. Створено програмне забезпечення, яке реалізує запропоновані моделі. В даний час реалізована комп'ютерна гра для версій класичного та швидкого снукера. Розроблено режим підказок, який демонструє гравцю довідку про ситуацію, що виникла, рекомендації щодо вибору удару, дозволяє відновити розміщення куль тощо. Мови спілкування гравця з програмою – українська та англійська. Програмне забезпечення успішно протестоване.

Ключові слова: *комп'ютерна гра, алгоритм, комп'ютерна модель, об'єктно-орієнтований підхід, функція, програмний клас, класичний снукер, швидкий снукер, режим підказок.*

O. B. KUNGURTSEV
Candidate of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Software Engineering
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0000-0002-3207-7315

P. M. GUZAR
Student
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0008-2175-5513

T. O. NOVIKOVA
Assistant at the Department of Software Engineering
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0004-5755-9275

T. S. FEDIANIN
Student
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0008-2175-5513

B. V. CHEBANENKO
Student
Odesa Polytechnic National University
ORCID: 0009-0004-5186-2353

COMPUTER MODELS FOR SNOOKER GAME AND TIP

This article focuses on developing a computer model for the game of snooker, which, along with simulating a real game, analyses the game situation and suggests effective strategies for its continuation. The article shows the increasing popularity of snooker all over the world. The article reviews existing computer snooker games and highlights their shortcomings, particularly in supporting novice players. Many current models lack features that clarify rules in specific situations, suggest effective options for the next move, and assist in selecting the point and direction for the cue. Additionally, some game variants are not adequately implemented, and it is challenging to determine how closely they comply with the actual rules of the game and real-life scenarios on the playing field. The article proposes creating a computer version of the game based on algorithms that reflect the real game's rules and the features associated with its implementation. An object-oriented design technology is used to support possible software modifications. Various models of game elements were created, including a model of a game table, cue ball, and target ball, as well as models for game control and time management. Each model has several functions that determine the behaviour of the corresponding object in certain situations. These models are implemented as program classes, allowing for updates and improvements to the software through inheritance and composition when necessary. Software implementing the proposed models has been created. Currently, a computer game for classic and fast snooker versions has been implemented. A hints mode has been developed, providing the player with information about the game situation, recommendations for shot selection, and the ability to restore the placement of balls. The software supports communication in both Ukrainian and English and has been successfully tested.

Key words: *computer game, algorithm, computer model, object-oriented approach, function, program class, classic snooker, fast snooker, hints mode.*

Постановка проблеми

Гра в снукер – один з найбільш поширених і складних різновидів більярду. Снукер дуже популярний у Великій Британії [1], Китаї, набуває все більше прихильників в Азії, західної Європі і на пострадянському просторі [2].

Популярність гри спричинила створення комп'ютерних варіантів гри [3], які стали досить популярні. Однак, практично відсутня інформація про підтримку правил гри, які у комп'ютерному варіанті дещо відрізняються від реальної гри. Крім цього, у відомих іграх мало уваги приділено проблемам, що виникають у недосвідченого гравця: аналіз помилок, демонстрація правильного рішення в певній ситуації, підказка про природу ситуації, що склалася, і застосовувані до неї правила. Таким чином, існує проблема створення моделей гри в снукер із додатковим сервісом для недосвідчених гравців.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У останні роки з'явилася низка досліджень, присвячених фізичним основам гри. У роботі [4] досліджено рух прицільної кулі після зіткнення з битком. Траєкторії руху куль проаналізовано у дослідженні [5]. Визначення траєкторії та швидкості руху кулі після зіткнення з бортом представлено у дослідженні [6]. Повний аналіз руху битка, якому надано різкий імпульс паралельний горизонтальній поверхні, з урахуванням ковзання та обертання наведено у дослідженні [7]. Таким чином фізика руху куль у снукері досить вивчена і може бути реалізована в комп'ютерних моделях гри. Одночасно у відомих варіантах гри [3]. майже відсутні підказки, елементи тренування гравців, аналіз ситуацій. Відсутність комп'ютерних моделей гри не дозволяє зрозуміти повноту реалізації правил гри.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є створення комп'ютерної моделі гри, яка дозволяє реалізувати різні варіанти гри і одночасно забезпечити підтримку недосвідченим гравцям у вигляді підказок і аналізу ситуацій по ходу гри.

Викладання основного матеріалу досліджень

Відповідно до визначеної мети запропоновано створити наступні математичні моделі: модель столу, модель битка, модель прицільної кулі, моделі управління грою та часом гри, модель тренувального режиму.

Модель битка має всю інформацію щодо розташування битка та параметрів удару.

$$CueBall = \langle InitCoord, CurrentCoord, MotionVector, Rotation, Slowdown, CueTilt, ObjectBall \rangle, \quad (1)$$

де $InitCoord = \langle x_0, y_0 \rangle$ – початкові координати кулі; $CurrentCoord = \langle x_t, y_t \rangle$ – поточні координати кулі; $MotionVector = \langle \Delta_x, \Delta_y \rangle$ – вектор руху кулі; $Rotation = \langle x_b, y_b \rangle$ – обертання кулі; $Slowdown$ – уповільнення руху кулі; $CueTilt$ – нахил кия при ударі; $ObjectBall = RedN,N = 1\ldots15 | Yellow | Green | Brown | Blue | Pink | Black$ прицільна куля (для кольорових куль – замовлена куля).

Функції моделі битка представлено у таблиці 1. Якщо функції мають аргументи, то це показано трьома крапками у дужках.

Таблиця 1

Функції моделі битка

№	Назва функції	Призначення функції
1	*fShotCueBall*(…)	Удар по битку
2	*fCollisionCueBall*()	Зіткнення з бортом, губками лузи, іншою кулею
3	*fPlayHand*(…)	Биток грається з руки
4	*fReturnCueBall*()	Фол, пов'язаний з битком

Модель прицільної кулі може представляти червоні і кольорові кулі

$$ObjectBall = \langle TypeBall, InitCoord, CurrentCoord, MotionVector, Slowdown \rangle \quad (2)$$
$$TypeBall = RedN,N = 1..15 | Yellow | Green | Brown | Blue | Pink |,$$

де $InitCoord = \langle x_0, y_0 \rangle$ – початкові координати кулі залежать від типу кулі $InitCoord = f(TypeBall)$. Для червоної кулі це координати у межах трикутника, які використовуються тільки на початку партії. Для кольорової кулі це певна позиція на столі, яка використовується багато разів у процесі гри. Крім того, якщо куля потрапляє у лузу, то саме *TypeBall* визначає кількість очок.

Таблиця 2

Функції моделі прицільної кулі

№	Назва функції	Призначення функції
1	*fRBinPocket*(…)	Червона куля потрапляє у лузу
2	*fCBinPocket*(…)	Кольорова куля потрапляє у лузу
3	*fScoreChange*(..)	Нарахування очок гравцю

Функція *fScoreChange*(..) визначає очки, які нараховані гравцям відповідно до типу кулі (звичайні або штрафні).

Модель столу включає ігрове поле і лузи (рис. 1), моделі куль і виконує основні дії щодо визначення зіткнень і повернення куль.

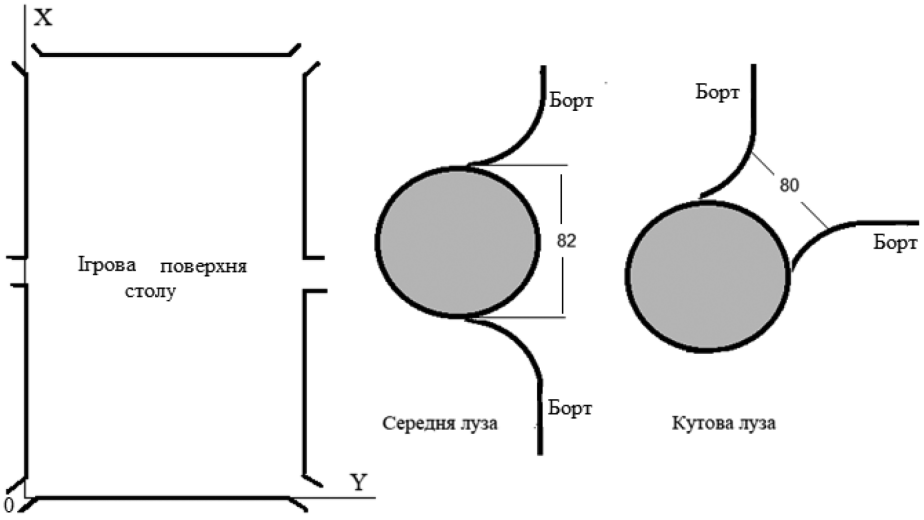


Рис. 1. Геометрія столу і луз

$$SnookerTable = \langle Table, mBallPosition, mBallCurrentPosition \rangle \quad (3)$$

$Table = \langle PlayingField, mSide, mPocket \rangle$ – стіл;

PlayingField = ⟨*Length,Width*⟩ – ігрове поле. Стандартна довжина – *Length* = 36 576 мм, стандартна ширина – *Width* = 18 288 мм.

mSide = {*TopSide,BottomSide,LeftSide,RightSide*} – борти;

mPocket = {*TopLeftPocket, TopRightPocket, MiddleLeftPocket, MiddleRightPocket, BottomLeftPocket, BottomRightPocket*} – множина луз.

mBallPosition = {⟨*BallName,X0Ball,Y0Ball*⟩} – початкове розташування куль, включає назву кулі – *BallName* і координати на столі – *X0Ball,Y0Ball*;

mBallCurrentPosition = {⟨*BallName, XcBall, YcBall, OnTable*⟩} – поточне розташування куль. Якщо куля відсутня, її координати будуть від'ємні.

Таблиця 3

Функції моделі столу

№	Назва функції	Призначення функції
1	*fInitPlaceBalls*()	Розстановка куль для початку гри
2	*fBallsCollision*(…)	Зіткнення двох куль
3	*fBallCollidedSide*(…)	Зіткнення кулі з бортом
4	*fBallCollidedPocketJaws*(…)	Зіткнення кулі з губками лузи
5	*fPocketingRB*()	Влучення в лузу червоної кулі
6	*fPocketingCB*(…)	Влучення в лузу кольорової кулі
7	*fReturnCB*(..)	Повернення до столу кольорової кулі
8	*fNoCollisionBallAndSide*()	Відсутність торкання борта кулею

Функція *fBallsCollision*(…) розраховує вектори руху двох куль після зіткнення на основі векторів їх руху перед зіткненням.

Функція *fBallCollidedPocketJaws*(…) розраховує вектор руху кулі в залежності від точки зіткнення з губкою на основі вектору руху кулі перед зіткненням.

Модель керування грою потрібна для визначення ігрових ситуацій, нарахування очок, виконання певних дій у тренувальному режимі тощо.

$$GameControl = \langle Players,APlayer,Points,Winner,MaxFr,SnookerSituation\rangle, \quad (4)$$

де *Players* = ⟨*Player1, Player2*⟩ – перший і другий гравці; *Player_i* = ⟨*FirstName,LastName,Country,Rating*⟩; *APlayer* – активний гравець; *Points* = ⟨*Points1,Points2,FramesWon1,FramesWon2*⟩ – кількість очок першого і другого гравця у поточному фреймі; кількість виграних фреймів першим і другим гравцем; *Winner* – переможець фрейму; *MaxFr* – максимальна кількість фреймів у зустрічі; *SnookerSituation* – ситуації, які вимагають застосування певних правил: "*Foul*", "*Foul and Miss*", "*Snooker*", "*Free ball*".

Таблиця 4

Функції моделі керування грою

№	Назва функції	Призначення функції
1	*fActivePlayer*()	Визначення активного гравця
2	*fDefSituation*()	Визначення певної ситуації під час гри
3	*fAddingPoints*()	Додавання очок гравцю
4	*fDefWinner*()	Визначення переможця
5	*fUpdateStatistics*()	Оновити статистику по гравцям і турніру
6	*fFixCenturyBr*()	Фіксація брейку в 100 очок
8	*fRepeatSituation*(…)	Повторення ситуації
9	*fDemoCorrectShot*(…)	Демонстрація «правильного» удару
10	*fObjectBallSelection*(…)	Вибір прицільної кулі
11	*fDemoSituation*()	Демонстрація інформації відносно ситуації

Функція *fRepeatSituation*(…) дозволяє повторювати ситуацію для прийняття гравцем кращого рішення. Функція *fDemoCorrectShot*(…) демонструє «правильну» точку удару і зіткнення, а також напрям удару для придання певного напрямку руху прицільної кулі (рис. 2). Функція *fDemoSituation*() дає розгорнуту інформацію щодо ігрової ситуації. Функція *fObjectBallSelection*(…) дозволяє обрати прицільну кулю з найбільшою ймовірністю влучення у лузу.

Модель керування часом гри реалізує варіант гри – швидкий снукер, передбачає обмеження часу на підготовку удару і деякі інші зміни у правилах гри.

$$GameTimeManagement = \langle TTime,CTime,STime,APTime\rangle, \quad (5)$$

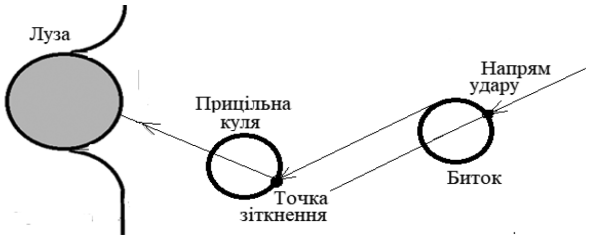


Рис. 2. Демонстрація «правильного» удару в тренувальному режимі

Таблиця 5

Функції моделі керування часом гри

№	Назва функції	Призначення функції
1	*fDataInit*()	Ініціалізація даних
2	*EndOfTimeWarning*()	Попередження щодо кінця часу
3	*fDefFoul*()	Визначення фолу
4	*fSetShotPrepareTime*()	Встановлення часу підготовки удару

де *TTime* – ліміт часу на фрейм; *CTime* – поточний час фрейму; *STime* – ліміт часу на підготовку удару; *APTime* – поточний час гравця під час підготовки до удару.

Модель тренувального режиму дає можливість відтворювати ігрові ситуації, фрагменти гри та виконувати підказки.

$$TrainingMode = \langle mSituation, mGamePieces \rangle, \quad (6)$$

де *mSituation* – множина ігрових ситуацій; *mGamePieces* – множина фрагментів гри.

Таблиця 6

Функції моделі тренувального режиму

№	Назва функції	Призначення функції
1	SaveGamePiece(…)	Збереження фрагменту гри
2	SaveSituation(…)	Збереження ігрової ситуації
3	ReplicateSituation(…)	Демонстрація ігрової ситуації
4	ReplicateGamePiece(…)	Демонстрація фрагменту гри
5	DemoCorrectShot(…)	Демонстрація коректного удару
6	ObjectBallSelect(…)	Вибір прицільної кулі

Діаграма класів представляє важливий етап створення програмного забезпечення для гри. Розглянуті моделі дають змогу реалізувати об'єктно-орієнтований підхід до розробки програми гри [8]. Це дозволяє реалізувати відносини спадкування та агрегації [9], що спрощує модифікацію програми.

На рис. 3 представлені програмні класи, що реалізують варіант класичного снукера, швидкого снукера (Shot out) та режим тренування.

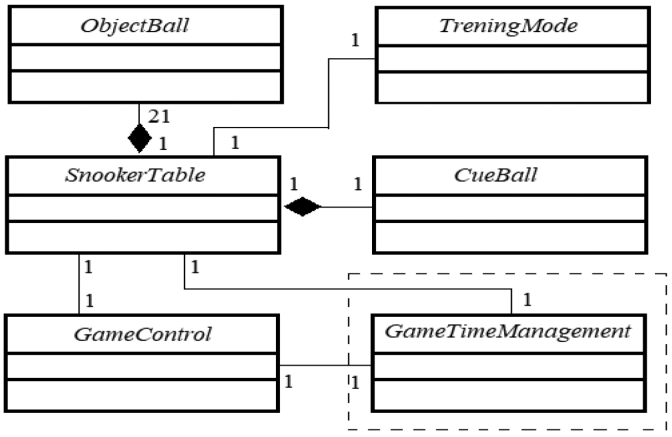


Рис. 3. Діаграма програмних класів

На основі розроблених моделей створено програму ESnookerCoach, яка успішно пройшла тестування.

На рис. 4 показано типовий момент тренування і підказку програми щодо вибору найкращої прицільної кулі (функція ObjectBallSelect(…)).

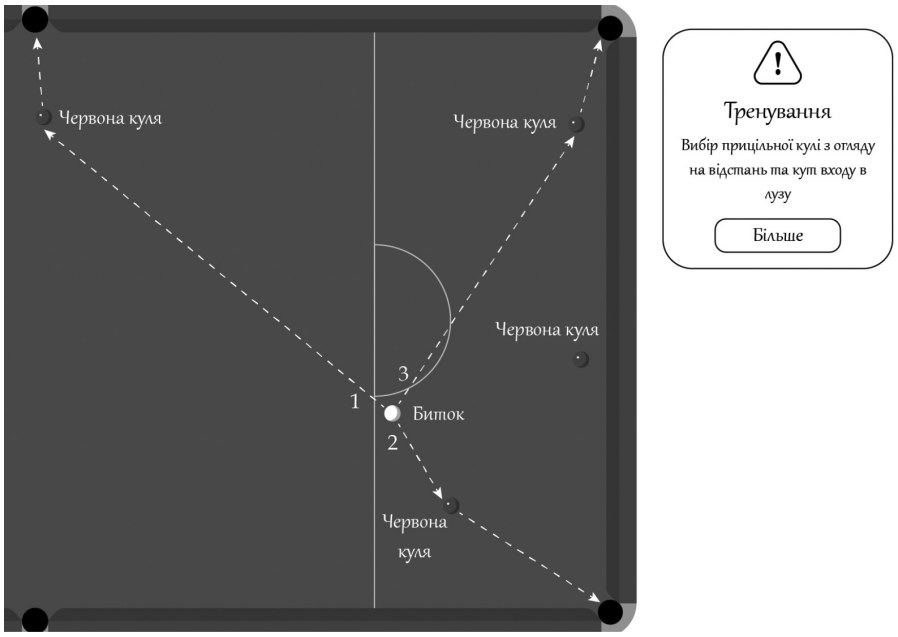


Рис. 4. Підказка щодо вибору прицільної кулі

На рис. 5 показано момент гри, коли зафіксовано ситуацію «Снукер» (функція *fDefSituation*()) і виведено додаткову інформацію (функція *fDemoSituation*()).

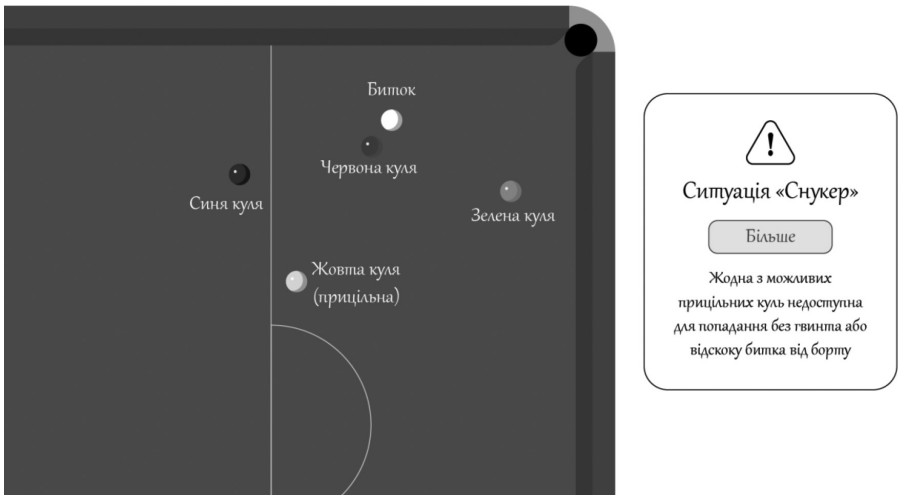


Рис. 5. Повідомлення щодо ситуації, що виникла

Висновки

Встановлено необхідність розробки моделей комп'ютерної гри в снукер для гравців-початківців. Створено моделі основних компонентів гри: столу, битку, прицільної кулі, організації гри, керуванням часом, тренувального режиму. Розроблені функції, що дозволяють швидше зрозуміти і освоїти гру для гравців-початківців. Створена програма реалізує гру на основі об'єктно-орієнтованої технології, що спрощує подальше вдосконалення моделі. Подальші дослідження спрямовані на моделювання ситуацій з бажаним виходом битка після удару та ефективним варіантом відіграшу.

Список використаної літератури

1. Rhys-Taylor, A. Changing Britain through the frame of snooker // *Sport in Society*. 2024, 1–17. URL: https://doi.org/10.1080/17430437.2024.2389812

2. Harris, L. J. The global snooker market // *Sport in Society*. 2021. № 24(10). Pp. 1718–1728. URL: https://doi.org/10.1080/17430437.2021.1901341

3. Steve C. Snooker 19 Review. (дата звернення 30.04.2019) URL: https://www.thesixthaxis.com/2019/04/30/snooker-19-review/

4. Hyeong-Chan Kim. Motions of a billiard ball after a cue stroke // New Phesics: Sae Mulli. 2022. Vol. 72, No. 3. Pp. 208–223. URL: http://dx.doi.org/10.3938/NPSM.72.208

5. Grzegorz Kudra, Michał Szewc, Igor Wojtunik, Jan Awrejcewicz. Shaping the trajectory of the billiard ball with approximations of the resultant contact forces// Mechatronics. 2016. Volume 37. Pp 54-62. URL: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.01.002

6. Antonio Doménech-Carbó. Independent friction-restitution description of billiard ball collisions//Mechanics Research Communications. 2023. Volume 131, 104149. URL: https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2023.104149

7. Abdullah Ozkanlar. Billiard Physics: Motion of a Cue Ball after Hit by a Cue Stick Horizontally // The Physics Educator. 2020. Vol. 02, No. 01, 2050003. URL: https://doi.org/10.1142/S2661339520500031

8. Kungurtsev O.B., Novikova N.O., Zinovatna S.L., Komleva N.O //Automated object-oriented for software module development. Applied Aspects of Information Technology. 2021. Vol. 4 No. 4. Pp. 338–353. URL: https://doi.org/10.15276/aait.04.2021.4

9. Kungurtsev, O., & Komleva, N. Implementation of class interaction under aggregation conditions//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. 2/2 (128). Pp. 20–30. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301011

References

1. Rhys-Taylor, A. Changing Britain through the frame of snooker // *Sport in Society*. 2024, 1–17. URL: https://doi.org/10.1080/17430437.2024.2389812

2. Harris, L. J. The global snooker market // *Sport in Society*. 2021. № 24(10). Pp. 1718–1728. URL: https://doi.org/10.1080/17430437.2021.1901341

3. Steve C. Snooker 19 Review. (дата звернення 30.04.2019) URL: https://www.thesixthaxis.com/2019/04/30/snooker-19-review/

4. Hyeong-Chan Kim. Motions of a billiard ball after a cue stroke// New Phesics: Sae Mulli. 2022. Vol. 72, No. 3. Pp. 208–223. URL: http://dx.doi.org/10.3938/NPSM.72.208

5. Grzegorz Kudra, Michał Szewc, Igor Wojtunik, Jan Awrejcewicz. Shaping the trajectory of the billiard ball with approximations of the resultant contact forces// Mechatronics. 2016. Volume 37. Pp 54–62. URL: https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2016.01.002

6. Antonio Doménech-Carbó. Independent friction-restitution description of billiard ball collisions //Mechanics Research Communications. 2023. Volume 131, 104149. URL: https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2023.104149

7. Abdullah Ozkanlar. Billiard Physics: Motion of a Cue Ball after Hit by a Cue Stick Horizontally // The Physics Educator. 2020. Vol. 02, No. 01, 2050003. URL: https://doi.org/10.1142/S2661339520500031

8. Kungurtsev O.B., Novikova N.O., Zinovatna S.L., Komleva N.O //Automated object-oriented for software module development. Applied Aspects of Information Technology. 2021. Vol. 4 No. 4. Pp. 338–353. URL: https://doi.org/10.15276/aait.04.2021.4

9. Kungurtsev, O., & Komleva, N. Implementation of class interaction under aggregation conditions//Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. 2/2 (128). Pp. 20-30. URL: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.301011

УДК 621.35 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.16

В. М. КУЧЕР
аспірант кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0009-5865-7375

Ю. Є. СКНАР
доктор хімічних наук, професор,
завідувач кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-1188-3684

І. В. СКНАР
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри процесів, апаратів та загальної хімічної технології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0001-8433-1285

Т. Є. БУТИРІНА
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри технології неорганічних речовин і екології
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-0619-6783

АНОДНЕ РОЗЧИНЕННЯ ОЛОВА І СВИНЦЮ В МЕТАНСУЛЬФОНАТНИХ РОЗЧИНАХ

Важливою прикладною задачею сьогодення є вибіркове виділення олова, свинцю, міді та інших цінних елементів зі сплавів, отриманих у процесі переробки відпрацьованої електронної та комп'ютерної техніки. Обсяг таких відходів стрімко зростає через швидкий розвиток інформаційних технологій і матеріалознавства, що спричиняє постійну потребу в оновленні електронних пристроїв. Переробка кольорових металів є економічно вигідною, сприяє екологічній безпеці і забезпечує промисловість критично важливими металами. Енергоефективним методом розділення металів у таких відходах є їх гідрометалургійна обробка. Багатокомпонентні сплави розчиняються у кислих або лужних середовищах, після чого проводиться селективне розділення окремих компонентів. Для одночасного розчинення олова і свинцю з брухту електротехнічного сплаву доцільно використовувати розчини вилуговування, в яких утворюються розчинні сполуки цих металів. Одними із найбільш перспективних в цьому аспекті є розчини на основі метансульфонової кислоти. Для контрольованого і селективного розчинення сплавів використовується метод анодного розчинення. В даній роботі проведено дослідження анодного розчинення олова і свинцю в розчині метансульфонової кислоти. В досліджені використано мембранний електроліз, при якому аноліт був відокремлений від католіту аніонообмінною мембраною. Встановлено, що стовідсоткове розчинення олова з утворенням іонів олова(II) відбувається у розчині 1 моль/л метансульфонової кислоти в діапазоні густин струму 0,5–3 А/дм^2. В діапазоні густини струму 3–6 А/дм^2 вихід за струмом утворення іонів олова(II) знижується внаслідок перебігу паралельного анодного процесу окиснення олова до олова(IV). Вихід за струмом анодного розчинення свинцю з утворенням іонів плюмбум(II) в досліджуваному інтервалі густин струму становить 100 %. Встановлено, що при концентруванні аноліту під час мембранного електролізу олова і свинцю спостерігається перехід води з католіту в аноліт під дією осмотичного тиску. Для нівелювання цього ефекту запропоновано підтримувати концентрацію кислоти у католіті на рівні 3,5 моль/л при концентруванні аноліту за іонами металів на рівні 1,85 моль/л.

Ключові слова: *олово, свинець, анодне розчинення, метансульфонатний розчин.*

V. M. KUCHER
Postgraduate Student at the Department of Processes,
Apparatuses and General Chemical Technology
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0009-0009-5865-7375

YU. E. SKNAR
Doctor of Chemical Sciences, Professor,
Head of the Department of Processes,
Apparatuses and General Chemical Technology
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-1188-3684

I. V. SKNAR
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Processes,
Apparatuses and General Chemical Technology
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0001-8433-1285

T. E. BUTYRINA
Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Technology of Inorganic Substances and Ecology
SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology"
Ukrainian State University of Science and Technology
ORCID: 0000-0002-0619-6783

ANODE DISSOLVING TIN AND LEAD IN METHANESULFONATE SOLUTIONS

An important applied problem today is the selective separation of tin, lead, copper and other valuable elements from alloys obtained in the process of recycling used electronic and computer equipment. The volume of such waste is growing rapidly due to the rapid development of information technology and materials science, which causes a constant need to update electronic devices. The recycling of non-ferrous metals is economically profitable, contributes to environmental safety and provides industry with critically important metals. An energy-efficient method of separating metals in such waste is their hydrometallurgical processing. Multicomponent alloys are dissolved in acidic or alkaline media, after which the individual components are selectively separated. For the simultaneous dissolution of tin and lead from scrap electrical alloy, it is advisable to use leaching solutions in which soluble compounds of these metals are formed. One of the most promising in this aspect are solutions based on methanesulfonic acid. For controlled and selective dissolution of alloys, the anodic dissolution method is used. In this work, a study of the anodic dissolution of tin and lead in a methanesulfonic acid solution was conducted. The study used membrane electrolysis, in which the anolyte was separated from the catholyte by an anion exchange membrane. It was established that one hundred percent dissolution of tin with the formation of tin(II) ions occurs in a 1 mol/l methanesulfonic acid solution in the range of current densities of 0.5–3 A/dm^2. In the range of current densities of 3–6 A/dm^2, the current yield of tin(II) ion formation decreases due to the parallel anodic oxidation process of tin to tin(IV). The current yield of anodic dissolution of lead with the formation of plumbum(II) ions in the studied range of current densities is 100 %. It has been established that when concentrating the anolyte during the membrane electrolysis of tin and lead, water is observed to move from the catholyte to the anolyte under the influence of osmotic pressure. To eliminate this effect, it is proposed to maintain the acid concentration in the catholyte at 3.5 mol/l while concentrating the anolyte in terms of metal ions at 1.85 mol/l.

Key words: *tin, lead, anodic dissolution, methanesulfonate solution.*

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток сучасних технологій передбачає використання все більших кількостей металевих ресурсів, необхідних у виготовленні електротехнічної та комп'ютерної техніки. Найбільш економічно доцільним є рециклінгове використання металів. З огляду на це, важливою науково-практичною задачею є розробка методів переробки електротехнічного брухту. Енергоощадним методом вилучення цінних металів з відходів є гідрометалургійна переробка і, зокрема, електрохімічний спосіб розчинення багатокомпонентного сплаву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Постійне збільшення промислових відходів завдає шкоди навколишньому середовищу і призводить до втрати цінних речовин. Одним з джерел відходів, що містять багато цінних компонентів є електротехнічні прилади і комп'ютерна техніка [1, 2]. Тому, такі відходи підлягають глибинній переробці з вилучення, зокрема, цінних металів [3]. Одним із найбільш поширених кольорових металів, що використовується у промисловості є олово. При гідрометалургійній переробці олововмісних відходів метал розчиняють в лужних або кислих розчинах вилуговування [4]. В якості кислотного середовища використовують суміш нітратної та хлоридної кислот [5]. Проте, окрім олова в електротехнічному брухті присутній свинець, і для переводу його у розчинну форму необхідно

використовувати розчини іншого аніонного складу. Високою розчинністю солей олова і свинцю характеризуються метансульфонатні сполуки відповідних металів [6]. Метансульфонова кислота не є окиснювальною, тому для розчинення олова і свинцю з електротехнічного брухту необхідно використовувати окисники або проводити електрохімічне розчинення цього матеріалу.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття

Електрохімічне розчинення електротехнічного брухту з метою переводу олова та свинцю у розчинну форму є перспективним способом переробки вторинної сировини при рециклінговому використанні цих металів. Наразі, невирішеною є задача з визначення умов анодного розчинення олова і свинцю в метансульфоновій кислоті при переробці електротехнічного брухту.

Формулювання мети дослідження

Метою цієї роботи було дослідити залежність виходу за струмом переходу олова і свинцю у іонну форму від густини анодного струму та визначити умови концентрування іонів цих металів при мембранному електролізі.

Викладення основного матеріалу дослідження

Концентрацію іонів стануму(II) у досліджувани розчинах визначали йодометрією наступним чином. Пробу електроліту об'ємом 2 см^3 вносили у конічну колбу на 100 см^3, додавали 20 см^3 дистильованої води і 1 см^3 1%-вого розчину крохмалю. Потім титрували розчином I_2 відомої концентрації до появи фіалкового забарвлення. Концентрацію іонів стануму(II) (моль/дм^3) визначали за формулою:

$$C_{Sn^{2+}} = \frac{C_{I_2} \cdot V_{I_2}}{2V_{пр}}, \quad (1)$$

де C_{I_2} – концентрація розчину I_2, визначена титриметрично, моль/дм^3, V_{I_2} – об'єм розчину I_2, який пішов на титрування, см^3, $V_{пр}$ – об'єм проби електроліту, взятий на титрування, см^3.

Визначення концентрації свинцю проводили гравіметричним способом при додаванні до аліквоти, що містить іони плюмбум(II), розчину сульфатної кислоти і подальшому зважуванні відфільтрованого і висушеного осаду сульфату свинцю.

Вольтамперні залежності отримували за допомогою потенціостату MTech SPG-500fast. Робочим електродом слугувала мідна пластина $S = 0{,}01$ дм^2 з попередньо нанесеним на неї олов'яним покривом. У якості допоміжного електроду слугував олов'яний анод, а електродом порівняння – насичений хлорид-срібний електрод. Швидкість розгортки складала 20 мВ/с.

Сутність мембранного електролізу концентрування солей свинцю й олова полягає в наступному. В анодному просторі електролізера, розділеного аніонообмінною мембраною, відбувається розчинення анода з переходом іонів металу в розчин (рис. 1). На катоді відновлюються іони водню, які поставляє метансульфонова кислота, поміщена в католіт. Перенос струму через мембрану здійснюється метансульфонат-іонами, що мігрують з катодного простору в анодний. Таким чином у католіті спостерігається зменшення концентрації кислоти, у аноліті – наробіток метансульфонату металу (рис. 1). Через недосконаліть мембрани має місце незначний перенос іонів металу й іонів водню з аноліту в католіт і паралельно відновленню іонів водню протікає реакція виділення металу. На аноді, теоретично можливе розкладання води з виділенням кисню, при досягненні відповідного потенціалу.

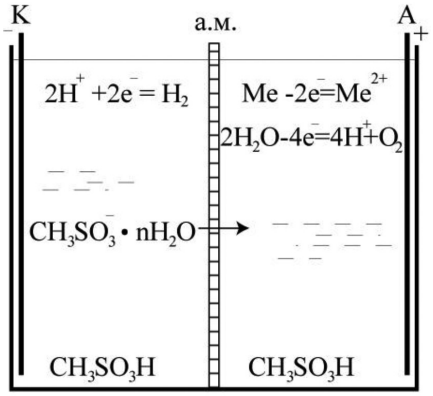


Рис. 1. Схема електрохімічної комірки з аніонообмінною мембраною для анодного розчинення олова і свинцю

Дослідження анодного розчинення олова, у процесі концентрування розчину метансульфоната олова в комірці з аніонообмінною мембраною, показали, що в діапазоні густин струму від 0,5 до 3 А/дм^2 відбувається

еквівалентний перехід Sn у Sn^{2+} (рис. 2, крива *1*). Збільшення густини струму понад 3 А/дм^2 приводить до утворення поряд з Sn^{2+} іонів Sn^{4+}. Причому з підвищенням густини струму до 6 А/дм^2 спостерігається збільшення виходу за струмом чотирьохвалентного олова (рис. 3.2, крива 2).

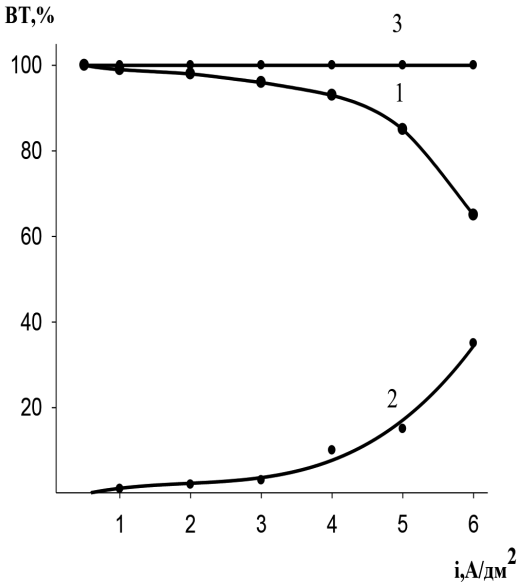


Рис. 2. Залежність виходу за струмом реакцій анодного розчинення олова і свинцю в розчині CH_3SO_3H (1 моль/л) від густини струму: 1 – наробіток Sn^{2+}; 2 – наробіток Sn^{4+}; 3 – наробіток Pb^{2+}

Утворення іонів Sn^{4+} можливе в результаті окислювання Sn^{2+} на аноді або розчиненим в електроліті киснем повітря або при переході $Sn^0 \rightarrow Sn^{4+}$. Стандартні потенціали реакцій окислення олова складають: $E^0_{Sn^0/Sn^{2+}} = -0{,}136$ В, $E^0_{Sn^{2+}/Sn^{4+}} = 0{,}15$ В, $E^0_{Sn^0/Sn^{4+}} = 0{,}009$ В.

Окиснення іонів двовалентного олова розчиненим в електроліті киснем не повинне залежати від густини струму розчинення металу, і швидкість цього процесу недостатня для того, щоб іони Sn^{4+} були напрацьовані в кількостях, що можуть бути визначені аналітично протягом часу проведення експерименту (60 хвилин).

Як видно з рис. 3 (крива *1*), у досліджуваному діапазоні густини струму відбувається зсув потенціалу олов'яного електрода не більше ніж на 100 мВ. Таким чином, область потенціалів, у якій відбувається окиснення

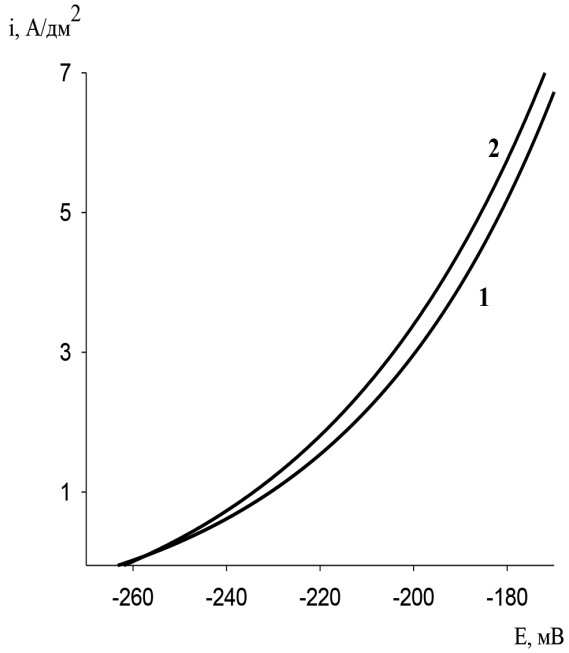


Рис. 3. Вольтамперні криві анодного розчинення олова (1) і свинцю (2) у розчині 1 моль/л CH_3SO_3H

олово(II) → олово(IV), не досягається. Очевидно, утворення чотирьохвалентного олова при підвищенні анодної густини струму обумовлено протіканням процесу $Sn^0 \rightarrow Sn^{4+}$.

Анодне розчинення свинцю, у діапазоні густин струму 0,5–6 А/дм^2, протікає зі 100%-м виходом за струмом (рис. 2, крива *3*). Згідно з вольтамперною залежністю, наведеною на рис. 3 (крива *2*), у досліджуваному діапазоні густин струму розчинення свинцю протікає без значного зсуву потенціалу, і процес, мабуть, не супроводжується істотною сольовою пасивацією.

На підставі отриманих даних був зроблений висновок про те, що для того, щоб уникнути протікання побічних реакцій концентрування метансульфоната олова, необхідно проводити при анодній густині струму 2 А/дм^2. Для одержання солі свинцю можна задатися більшою густиною струму. Однак проведені досліди показали, що високі анодні густини струму сприяють нерівномірному розчиненню анода і його механічному руйнуванню. Тому, щоб уникнути втрат свинцю у вигляді шламу, була обрана густина струму розчинення 2 А/дм^2.

При одержанні концентрату олова в аноліт був поміщений розчин метансульфонової кислоти з концентрацією 1 моль/л. Така кількість кислоти необхідна для запобігання гідролізу солі олова, що утвориться. У дослідах по концентруванню солі свинцю також використовувався розчин кислоти з концентрацією 1 моль/л.

У результаті електролізу з аніонообмінною мембраною концентрація кислоти в аноліті змінюватися не повинна, а аніони кислоти в еквівалентному іонам олова кількості переходять з католіту в аноліт. Виходячи з цього, у католіт варто помістити розчин кислоти з концентрацією, достатньою для утворення солі заданої концентрації. У відповідності до приведених вище міркувань при одержанні концентрату метансульфоната олова і свинцю в католіті містилася кислота концентрацією 3,7 моль/л. Отже, очікувана концентрація солей 1,85 моль/л.

Як видно з рис. 4 (криві 1 і 2), залежності концентрації солей від часу проведення електролізу мають лінійний характер, отже концентрування розчинів до значень 1,2 моль/л протікає прямо пропорційно пропущеній електриці. Розрахунки показали, що збиток маси анода цілком відповідає збільшенню концентрації іонів металів у розчині. Збільшення часу анодного розчинення металів більш 12 годин приводить до зміни ходу кривих 1 і 2 (рис. 4), і залежності виходять на постійне значення 1,5 моль/л. При подальшому проведенні електролізу концентрація розчинів не змінюється.

Аналітичний контроль вмісту кислоти в католіті показав, що через 12 годин електролізу збиток кислоти був еквівалентний кількості отриманих солей і склав 2,4 моль/л. Протягом наступного електролізу спостерігалося нееквівалентне зниження концентрації кислоти, а саме, концентрація кислоти була більше за очікувану.

У той же час було виявлено, що рівень аноліту підвищується. Очевидно, сталість концентрації солей металів в аноліті, що спостерігається в процесі електролізу, обумовлена розведенням розчину водою, що надходить з католіту. Можна припустити, що вода в аноліт надходить у вигляді сольватної оболонки разом з мігруючими аніонами $CH_3SO_3^-$. Однак такий перенос повинний відбуватися протягом усього часу електролізу. У той же час протягом 12 годин електролізу зміни об'єму аноліту не зафіксовано. Очевидно, концентрування електроліту в анодному просторі і розведення розчину в катодному просторі призводять до виникнення осмотичного тиску і часткового переходу розчинника в більш концентрований розчин. Оскільки площа дзеркала католіту в умовах експерименту дорівнює площі дзеркала аноліту, то зміна обсягу розчинів пропорційна зміні їхнього рівня в анодному і катодному просторах.

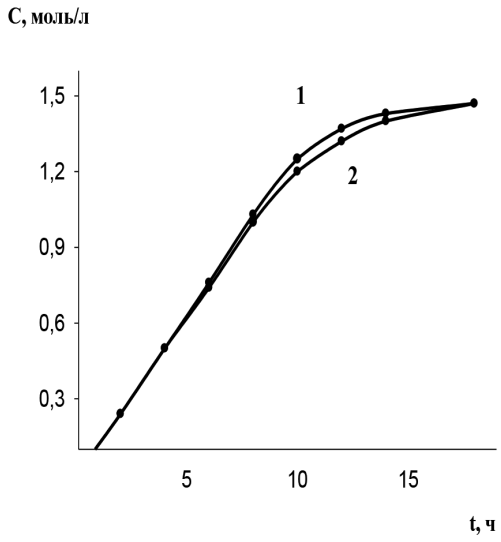


Рис. 4. Залежність концентрації іонів металів в аноліті від часу мембранного електролізу (V = 150 мл, I = 1 А): 1 – Sn^{2+}; 2 – Pb^{2+}

Як видно з рис. 5, помітна зміна рівня аноліту (крива 3) починає спостерігатися після 12 годин електролізу. Зміна рівня католіту при цьому збільшується (крива 2) і складається зі збитку за рахунок витрати кислоти (крива 1) і переходу води в аноліт (крива 3).

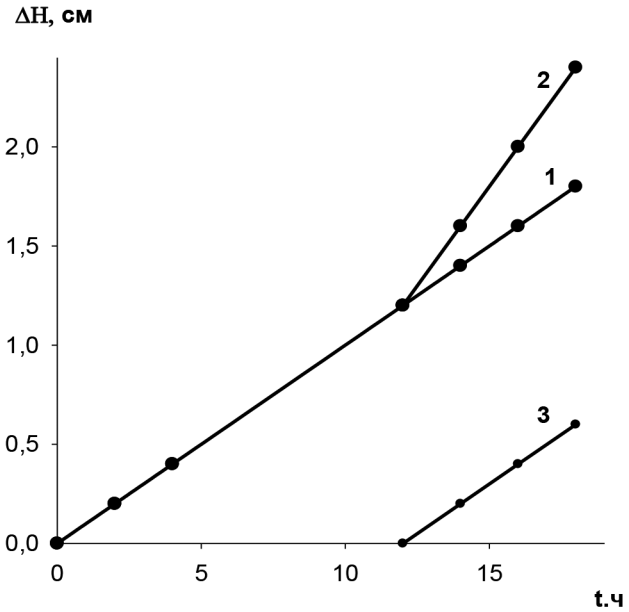


Рис. 5. Залежність зміни рівня електроліту від часу мембранного електролізу (*V* = 150 мл, *I* = 1 А): 1 – у католіті внаслідок вироблення кислоти; 2 – загальна зміна рівня в католіті; 3 – в аноліті

На користь припущення про наявність у досліджуваній системі осмотичного ефекту вказують і результати наступного експерименту. У мембранному електролізері з концентрованим до 1,85 моль/л Sn^{2+} анолітом катодний простір був заповнений дистильованою водою. По закінченню 20 годин експозиції даної комірки без накладення електричного струму рівень анодного простору піднявся на 0,4 см. Очевидно, тут має місце осмос.

Для того, щоб можна було одержати концентрати олова і свинцю торгівельної концентрації 1,85 моль/л необхідно підтримувати концентрацію CH_3SO_3H у католіті не нижче 3,5 моль/л. Це можливо при безперервному коригуванні розчину по мірі вироблення кислоти в результаті електролізу.

Висновки

Проведені дослідження анодного розчинення олова й свинцю у метансульфоновій кислоті, які дозволили встановити, що розчинення олова з утворенням Sn^{2+} протікає зі 100%-м виходом за струмом у діапазоні густин струму 0,5–3 А/дм^2. В діапазоні густин струму 3–6 А/дм^2 вихід за струмом Sn^{2+} знижується внаслідок перебігу паралельного процесу $Sn^0 \rightarrow Sn^{4+}$. Вихід за струмом анодного розчинення свинцю з утворенням Pb^{2+} в досліджуваному інтервалі густин струму становить 100 %.

Встановлено, що при концентруванні метансульфонатних солей олова і свинцю з використанням електролізеру з аніонообмінною мембраною без коригування католіту кислотою, спостерігається перехід води з католіту в аноліт. Даний феномен, швидше за все, зумовлений виникненням осмотичного тиску, внаслідок значної відмінності активностей іонів в католіті і аноліті. Для концентрування метансульфонатів олова і свинцю до концентрацій 1,85 моль/л запропоновано підтримувати концентрацію кислоти у католіті на рівні 3,5 моль/л шляхом коригування складу католіту.

Список використаної літератури

1. Ajekwene K. K., et. al. Electronic Waste (E-Waste): Sources, Proliferation, Effects & Management in Developing Nations. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*. Vol. 12(01). 2022. P. 12–27.

2. Isildar A., Rene E. R., Van Hullebusch E. D. and Lens P. N. L. Electronic Waste as a Secondary Source of Critical Metals: Management and Recovery Technologies. *Resources, Conservation and Recycling*. № 135. 2018. P. 296–312. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031

3. Baez A. G., Mucoz L. P., Garelick H., Purchase D. Characterization of industrially pre-treated waste printed circuit boards for the potential recovery of rare earth elements. *Environmental Technology & Innovation*. № 27. 2022. P. 102481.

4. Jumari A., Purwanto A., Nur A., Budiman A. W., Lerian M., Paramita F. A. Tin recovery from tin slag using electrolysis method. AIP *Conference Proceedings*. № 1931. 2018. P. 030011. doi: 10.1063/1.5024070

5. da Silva M. S. B., de Melo R. A. C., Lopes-Moriyama A. L., Souza C. P. Electrochemical extraction of tin and copper from acid leachate of printed circuit boards using copper electrodes. *Journal of Environmental Management*. № 246. 2019. P. 410–417.

6. Gernon M. D., Wu M., Buszta T., Janney P. Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages. *Green Chemistry*. № 3. 1999. P. 127–140.

References

1. Ajekwene K. K., et. al. (2022) Electronic Waste (E-Waste): Sources, Proliferation, Effects & Management in Developing Nations. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, Vol. 12(01), pp. 12–27.

2. Isildar, A., Rene, E. R., Van Hullebusch, E. D. and Lens, P. N. L. (2018) Electronic Waste as a Secondary Source of Critical Metals: Management and Recovery Technologies. *Resources, Conservation and Recycling*, no. 135, pp. 296–312. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031

3. Baez A. G., Mucoz L. P., Garelick H., Purchase D. (2022) Characterization of industrially pre-treated waste printed circuit boards for the potential recovery of rare earth elements. *Environmental Technology & Innovation*, no. 27, p. 102481.

4. Jumari A., Purwanto A., Nur A., Budiman A. W., Lerian M., Paramita F. A. (2018) Tin recovery from tin slag using electrolysis method. *AIP Conference Proceedings*, no. 1931, p. 030011. doi: https://doi.org/ 10.1063/1.5024070

5. da Silva M. S. B., de Melo R. A. C., Lopes-Moriyama A. L., Souza C. P. (2019) Electrochemical extraction of tin and copper from acid leachate of printed circuit boards using copper electrodes. *Journal of Environmental Management*, no. 246, pp. 410–417.

6. Gernon M. D., Wu M., Buszta T., Janney P. (1999) Environmental benefits of methanesulfonic acid: Comparative properties and advantages. *Green Chemistry*, no. 3, pp. 127–140.

УДК 621.865.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.17

С. В. ЛАПКОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-9870-9231

В. К. ФРОЛОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-3697-286X

В. О. КРАВЕЦЬ
інженер кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0005-6867-4858

О. М. КРАВЕЦЬ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри конструювання машин
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-7468-0956

Л. М. ДАНИЛОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-4442-3959

В. П. ПРИХОДЬКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології машинобудування
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-1852-3777

ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ФРАКТАЛЬНИХ ЛЕЩАТ ПРИ ПРОЄКТУВАННІ АДАПТИВНИХ ЗАХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ

Використання у промисловості промислових роботів – безальтернативний шлях підвищення продуктивності та якості сучасного виробництва. Найпопулярнішою роботизованою операцією у порівнянні з іншим операціями є роботизоване маніпулювання об'єктами виробництва. Промислові роботи, у яких робочим органом є захватний пристрій, можуть виконувати різноманітні завдання, що традиційно були притаманні рукам людини, можуть використовувати захватні пристрої в широкому діапазоні захвату та утримання різних об'єктів. Однак, незважаючи на велику чисельність захватних пристроїв, які зараз існують на промисловому ринку, ще є багато задач, які важко або, інколи, навіть і неможливо виконати захватному пристрою. Цим пояснюється великий попит на оригінальні конструкції адаптивних захватних пристроїв, які мають можливість конкурувати з людськими руками. Дана стаття присвячена вдосконаленню методів синтезу нових конструкцій адаптивних механічних захватних пристроїв за рахунок використання принципу дії фрактальних лещат. Метою даної статті є вирішення задачі синтезу нових варіантів конструкцій адаптивних механічних захватних пристроїв. У статті розглянуто конструктивні ознаки фрактальних лещат різних типів, які були винайдені ще на початку минулого століття. Користуючись результатами аналізу принципу дії фрактальних лещат та переваг останніх щодо уні-

версальності захвату деталей по криволінійних поверхнях, обґрунтована можливість проєктування цілої гами оригінальних конструкцій адаптивних механічних захватних пристроїв промислових роботів або маніпуляторів для транспортування вибухонебезпечних предметів, які можуть бути встановлені на мобільних платформах. У статті наведено декілька варіантів конструкцій механічних захватних пристроїв, спроєктованих з використанням принципу дії фрактальних лещат.

Ключові слова: *захватний пристрій, адаптивний, промисловий робот, конструкція, проєктування, лещата, фрактальні, захоплення, губки.*

S. V. LAPKOVSKY
Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-9870-9231

V. K. FROLOV
Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-3697-286X

V. O. KRAVETS
Engineer at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0005-6867-4858

O. M. KRAVETS
Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Machine Design
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-7468-0956

L. M. DANYLOVA
Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-4442-3959

V. P. PRYKHODKO
Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Manufacturing Engineering
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-1852-3777

USING THE OPERATING PRINCIPLE OF FRACTAL VICE IN THE DESIGN OF ADAPTIVE GRIPPERS

The use of industrial robots in industry is an unalternative way to increase the productivity and quality of modern production. For many years, the most popular robotic operation compared to other operations has been robotic manipulation of production objects. Industrial robots, in which the working body is a gripper, can perform a variety of tasks that have traditionally been inherent in human hands, and can use grippers in a very wide range of gripping and holding various objects. However, despite the large number of grippers that currently exist on the industrial market, there are still many tasks that are very difficult or, sometimes, even impossible to perform for a gripper. This clearly indicates a great demand for original designs of adaptive grippers that will be able to compete with human hands. This article is devoted to improving the methods of synthesizing new designs of adaptive mechanical grippers by using the principle of action of fractal vises. The purpose of this article is to solve the problem of synthesizing new

variants of designs of adaptive mechanical grippers. The article considers the design features of various fractal vices, which were invented at the beginning of the last century. Using the results of the analysis of the principle of operation of fractal vices and the excellent advantages of the latter in terms of the versatility of gripping parts on curved surfaces, the possibility of designing a whole range of new original designs of adaptive mechanical grippers for industrial robots or manipulators for transporting explosive objects, which can be installed on mobile platforms, is substantiated. The article presents several variants of the designed designs of new mechanical grippers, the designs of which require further careful research.

Key words: *gripper, adaptive, industrial robot, construction, designing, vice, fractal, grasping, jaws.*

Постановка проблеми

За даними звіту Міжнародної федерації робототехніки IFR, останнім часом саме маніпулювання об'єктами виробництва залишається найпоширенішою роботизованою операцією серед усіх роботизованих технологічних операцій (рис. 1) [1–3]. Слід відзначити, що, порівняно з 2022 роком, у 2023 році кількість інсталяцій промислових роботів у складанні впала на 23 %, тоді як у маніпулюванні об'єктами виробництва вона зросла на 4,5 % (рис. 1) [1–3]. Зрозуміло, що реалізація роботизованого маніпулювання можлива тільки у тому випадку, коли робочим органом промислового робота є захватний пристрій (ЗП). Це підтверджує актуальність розвитку методології проєктування ЗП.



а



б

Рис. 1. Відсоткове співвідношення кількості інсталяцій промислових роботів у виробництво: а – за видами операцій, б – за роками

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Ретельний аналіз інформаційних джерел вказує на те, що публікацій вітчизняних авторів, присвячених досліджуваній галузі, доволі мало. До таких робіт, перш за все, треба віднести наукові праці [4–8]. Але треба відзначити, що в роботах [4, 6, 7] стосовно проєктування ЗП наведена майже однакова, а, інколи, і застаріла інформація. Найбільш ґрунтовними та цікавими роботами, на думку авторів статті, можна вважати роботи [5, 8]. А от інформація стосовно створення адаптивних захватних пристроїв у вищезгаданих роботах практично відсутня. Що стосується публікацій зарубіжних авторів, то тут картина зовсім інша. За кордоном питанням проєктування й дослідження ЗП присвячено дуже багато наукових публікацій. Так, тільки у роботі науковців з Вісконсинського університету (Мілуокі, США) «Current Designs of Robotic Arm Grippers» [9] у переліку

посилань наведено 98 наукових робіт з досліджуваного питання, 76 із яких (78 %) були опубліковані в останні 10 років.

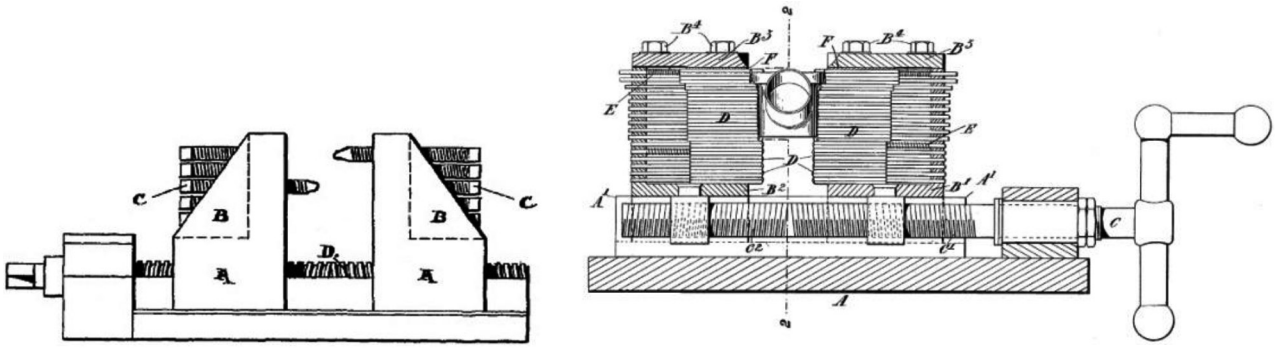
Формулювання мети дослідження

Метою статті є вдосконалення методології синтезу нових конструкцій механічних адаптивних захватних пристроїв за рахунок використання принципу дії фрактальних лещат.

Викладення основного матеріалу дослідження

Починаючи з 2021 року в мережі «Internet» почала з'являтися інформація про так звані «фрактальні лещата» [10, 11]. Слід відзначити, що слово «фрактальний» походить від латинського «fractus», що перекладається як «дробовий», «подрібнений», а поняття «фрактал» було введено математиком Бенуа Мендельбротом у 1975 році [12].

Аналіз інформаційних джерел дозволив зробити наступний висновок: пристрої, які зараз позиціонуються як «фрактальні лещата», були винайдені набагато раніше введення поняття «фрактал» – більше, ніж сто років тому. У якості підтвердження можна навести патенти 1899 року англійського винахідника Ернеста Генрі Джонса [13, 14] (рис. 2).



а *б*

Рис. 2. Винаходи 1899 року Ернеста Генрі Джонса: а – лещата у патенті GB-189,730,513; б – лещата у патенті US Patent: 626,427

На початку XX-го століття з'явилося декілька цікавих публікацій у популярних того часу в промислових колах американських журналах – «Machinery» за серпень 1918 року [15], «American Machinist» за травень 1923 року [16] та «The ROTARIAN» за березень 1927 року [17] (рис. 3).



а) б) в)

Рис. 3. Публікації на початку XX-го століття, присвячені лещатам: *а* – у журналі «Machinery»; *б* – у журналі «American Machinist»; *в* – у журналі «The ROTARIAN»

На рис. 3, *а* наведені лещата 1915-го року з універсальною насадкою від компанії «Universal Equalizer Co.» (м. Цинциннаті, США). На рис. 3, *б* наведені лещата 1913-го року від компанії «Mantle & Co.» (м. Нью-Йорк, США), які були створені на основі патенту австрійського інженера Пауліна Карла Кюнце (рис. 4) [18]. На рис. 3, *в* наведені лещата «Berjo» 1927-го року з універсальною насадкою від компанії «Avey Drilling Machine Co.» (м. Цинциннаті, США), які були створені на основі патентів австрійських інженерів Рудольфа Джокша та Оскара Берла (рис. 5) [19–21].

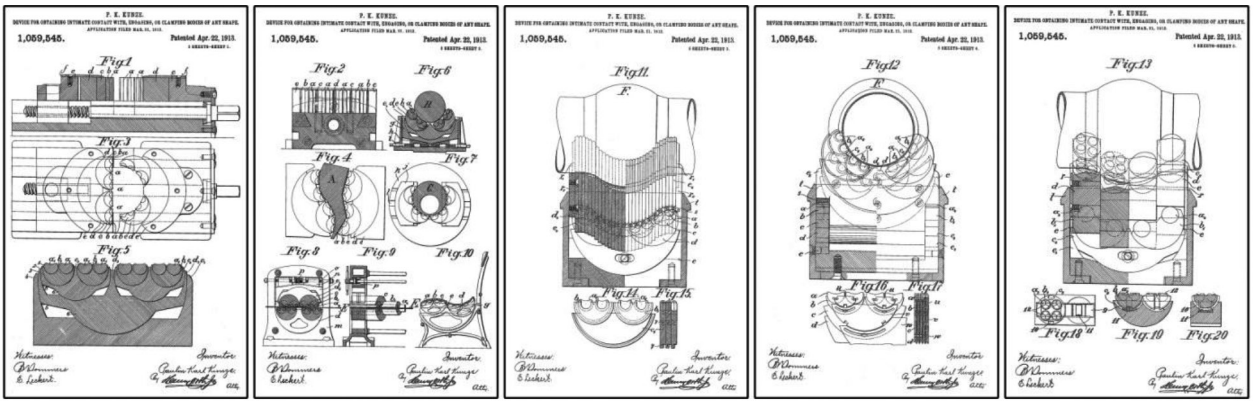
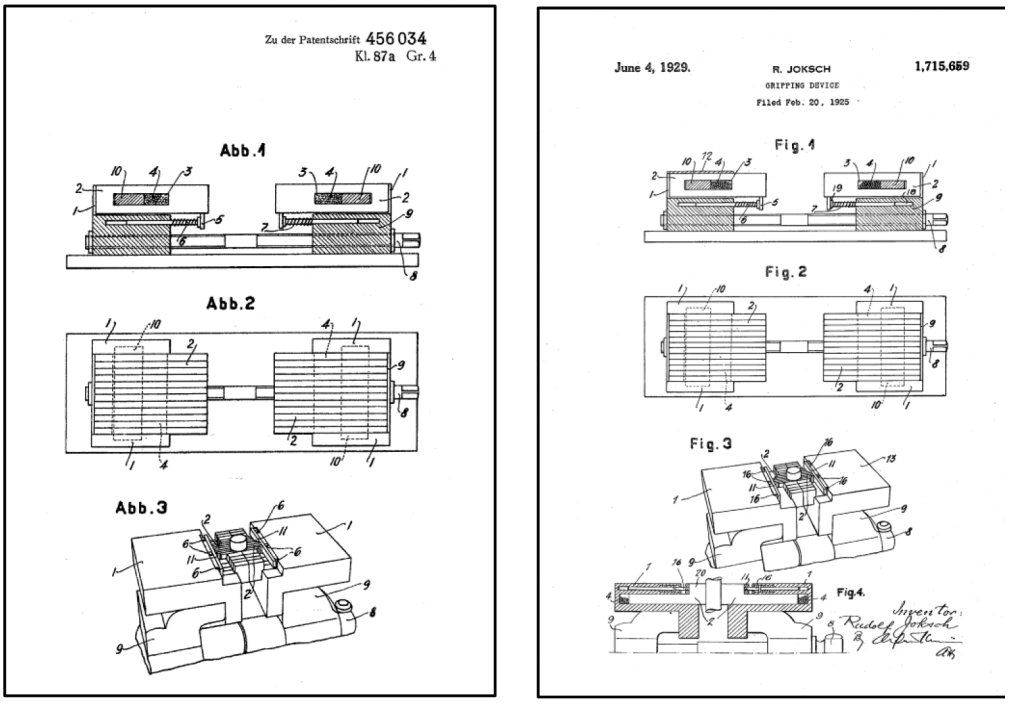


Рис. 4. Патент США Пауліна Карла Кюнце (US Patent: 1,059,545) [16]



а *б*

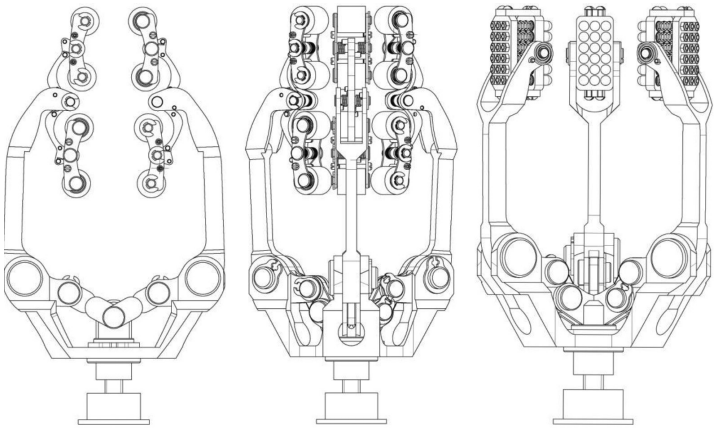
Рис. 5. Патенти Рудольфа Джокша та Оскара Берла: а – патент Німеччини Р. Джокша та О. Берла DE-456,034 [17]; б – патент США Р. Джокша US Patent: 1,715,659 [19]

Зрозуміло, що нічого, пов'язаного з фракталами, у назвах вищенаведених пристроїв в той час не могло бути. Так, Паулін Карл Кюнце назвав свій винахід як «Пристрій для встановлення тісного контакту з зачепленням або затисканням тіл будь-якої форми» [18], а Рудольф Джокш та Оскар Берл – як «Затискний пристрій для утримання тіла будь-якої форми» [19, 20].

Конструкції всіх вищенаведених лещат відрізняються одна від одної, але автори цих винаходів при створенні пристроїв мали єдину загальну мету: забезпечення надійного контакту захоплення деталей по криволінійних поверхнях. І можна вважати, що всі вони, тією чи іншою мірою, досягли цієї мети за рахунок рівномірного розподілу сили затиску у максимально можливій кількості точок контакту затискних елементів лещат з криволінійними поверхнями деталі. Використовуючи цей принцип, авторами статті було розроблено кілька оригінальних конструкцій адаптивних захватних пристроїв промислових роботів або маніпуляторів (рис. 6).

Висновки

Використання принципу дії фрактальних лещат та аналіз конструкцій останніх дозволив розробити схемні рішення нових конструкцій адаптивних захватних пристроїв промислових роботів або маніпуляторів для маніпулювання об'єктами зі складною формою захоплюваних поверхонь. Спроєктовані адаптивні захватні пристрої забезпечують надійне захоплення та переміщення об'єктів будь-якої форми. Запозичення принципу дії



а) б) в)

Рис. 6. Варіанти конструкцій адаптивних захватних пристроїв: *а* – двохпальцевий адаптивний захватний пристрій; *б* – трипальцевий адаптивний захватний пристрій; *в* – трипальцевий адаптивний захватний пристрій

фрактальних лещат дозволило розширити можливості проєктування цілої гами оригінальних захватних пристроїв з адаптацією їх конструкції до різних сфер застосування.

Список використаної літератури

1. *World Robotics 2024*. IFR International Federation of Robotics, 2024, 39 p. URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf
2. Кравець, В., Кравець, О., Адаменко, Ю., Лапковський, С., Кореньков, В., & Фролов, В. (2023). Аналіз розмірних зв'язків роботизованого комплексу. *Технічні науки та технології*, 3(33), 40–52. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-40-52
3. Кравець, В., Кравець, О., Лапковський, С., Фролов, В., Гладський, М., & Приходько, В. (2024). Аналіз розмірних зв'язків роботизованої складальної системи. *Вісник Херсонського національного технічного університету, 1*(88), 54–62. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.7
4. Ковальов, Ю. А., Кошель, С. О., & Манойленко, О. П. (2020). *Проєктування промислових роботів та маніпуляторів*. Центр учбової літератури
5. Павленко, І. І., & Годунко, М. О. (2020). *Захватні пристрої роботів*. ТОВ «КОД»
6. Пелевін, Л. Є., Почка, К. І., Гаркавенко, О. М., Міщук, Д. О., & Русан, І. В. (2016). *Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні*. ТОВ «НВП «Інтерсервіс»
7. Поліщук, М. М., & Ткач, М. М. (2021). *Робототехнічні системи: проєктування і моделювання*. КПІ ім. Ігоря Сікорського
8. Проць, Я. І. (2008). *Захоплювальні пристрої промислових роботів*. Тернопільський державний технічний університет ім. І. Пулюя
9. Hernandez, J., Sunny, M. S. H., Sanjuan, J., Rulik, I., Zarif, M. I. I., Ahamed, S. I., Ahmed, H. U., & Rahman, M. H. Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review. *Robotics 2023, 12*(1), 5. https://doi.org/10.3390/robotics12010005
10. *Fractal Vise*. (2021, July 09). www.thingiverse.com. URL: https://www.thingiverse.com/thing:4904044#google_vignette
11. Кузнєцов, Ю. М., Сінмінь, Г., Самойленко, О. В. (2021). Передумови використання системно-морфологічного підходу та теорії фракталів при створенні лещат для об'єктів складної форми. *Наукові вісті КПІ, 4*(134), 52–57. https://doi.org/10.20535/kpisn.2021.4.261849
12. Mandelbrot, B. B. (1975). *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*. Flammarion.
13. Ernest Henry Jones. (1899). *Improvements in or relating to Vices and the like* (GB Patent: GB-189,730,513). Intellectual Property Office.
14. Ernest Henry Jones. (1899). *Vice* (US Patent: 626,427). United States Patent and Trademark Office.
15. *The Universal Vise Attachment*. (2020, July 7). https://archive.org/. URL: https://archive.org/details/universalequalizercomachineryv24aug1918p390
16. *P. K. Kunze's Contribution To The World – A Vise With Oscillatable Cheeks*. (2021, November 8). tackyraccoons.com. URL: https://tackyraccoons.com/2021/11/08/p-k-kunzes-contribution-to-the-world-a-vise-with-oscillatable-cheeks/

17. *The Berjo-Vise: 1927*. (2021, March 30). https://archive.org/. URL: https://archive.org/details/berl-und-joksch-the-rotarian-vol-30-no-3-mar-1927-pg-53.

18. Paulin Karl Kunze. (1913). *Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape* (US Patent: 1,059,545). United States Patent and Trademark Office.

19. Rudolf Joksch, & Oskar Berl. (1928). *Einspannvorrichtung zum Festhalten beliebig geformter Körper* (DE Patent: DE-456,034). Deutschen Patent- und Markenamts.

20. Rudolf Joksch, & Oskar Berl. (1928). *Einspannvorrichtung zum Festhalten beliebig geformter Körper* (DE Patent: DE-460,324). Deutschen Patent- und Markenamts.

21. Rudolf Joksch. (1929). *Gripping Device* (US Patent: 1,715,659). United States Patent and Trademark Office.

References

1. *World Robotics 2024*. IFR International Federation of Robotics, 202439 p. URL: https://ifr.org/img/worldrobotics/Press_Conference_2024.pdf

2. Kravets, V., Kravets, O., Adamenko, Yu., Lapkovskyi, S., Korenkov, V., & Frolov, V. (2023). Analiz rozmirnykh zviazkiv robotyzovanoho kompleksu. *Tekhnichni nauky ta tekhnolohii*, 3(33), 40–52. https://doi.org/10.25140/2411-5363-2023-3(33)-40-52.

3. Kravets, V., Kravets, O., Lapkovskyi, S., Frolov, V., Hladskyi, M., & Prykhodko, V. (2024). Analiz rozmirnykh zviazkiv robotyzovanoi skladalnoi systemy. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 1(88), 54–62. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.7.

4. Kovalov, Yu. A., Koshel, S. O., & Manoilenko, O. P. (2020). *Proektuvannia promyslovykh robotiv ta manipuliatoriv*. Tsentr uchbovoi literatury.

5. Pavlenko, I. I., & Hodunko, M. O. (2020). *Zakhvatni prystroi robotiv*. TOV «KOD».

6. Pelevin, L. Ie., Pochka, K. I., Harkavenko, O. M., Mishchuk, D. O., & Rusan, I. V. (2016). *Syntez robototekhnichnykh system v mashynobuduvanni*. TOV «NVP «Interservis».

7. Polishchuk, M. M., & Tkach, M. M. (2021). *Robototekhnichni systemy: proiektuvannia i modeliuvannia*. KPI im. Ihoria Sikorskoho.

8. Prots, Ya. I. (2008). *Zakhopliuvalni prystroi promyslovykh robotiv*. Ternopilskyi derzhavnyi tekhnichnyi universytet im. I. Puliuia

9. Hernandez, J., Sunny, M. S. H., Sanjuan, J., Rulik, I., Zarif, M. I. I., Ahamed, S. I., Ahmed, H. U., & Rahman, M. H. Current Designs of Robotic Arm Grippers: A Comprehensive Systematic Review. *Robotics 2023, 12*(1), 5. https://doi.org/10.3390/robotics12010005

10. *Fractal Vise*. (2021, July 09). www.thingiverse.com. URL: https://www.thingiverse.com/thing:4904044#google_vignette

11. Kuznietsov, Yu. M., Sinmin, H., Samoilenko, O. V. (2021). Peredumovy vykorystannia systemno-morfolohichnoho pidkhodu ta teorii fraktaliv pry stvorenni leshchat dlia obiektiv skladnoi formy. *Naukovi visti KPI, 4*(134), 52–57. https://doi.org/10.20535/kpisn.2021.4.261849

12. Mandelbrot, B. B. (1975). *Les objets fractals: forme, hasard et dimension*. Flammarion.

13. Ernest Henry Jones. (1899). *Improvements in or relating to Vices and the like* (GB Patent: GB-189,730,513). Intellectual Property Office.

14. Ernest Henry Jones. (1899). *Vice* (US Patent: 626, 427). United States Patent and Trademark Office.

15. *The Universal Vise Attachment*. (2020, July 7). https://archive.org/. URL: https://archive.org/details/universalequalizercomachineryv24aug1918p390

16. *P. K. Kunze's Contribution To The World – A Vise With Oscillatable Cheeks*. (2021, November 8). tackyraccoons.com. URL: https://tackyraccoons.com/2021/11/08/p-k-kunzes-contribution-to-the-world-a-vise-with-oscillatable-cheeks/

17. *The Berjo-Vise: 1927*. (2021, March 30). https://archive.org/. URL: https://archive.org/details/berl-und-joksch-the-rotarian-vol-30-no-3-mar-1927-pg-53

18. Paulin Karl Kunze. (1913). *Device for obtaining intimate contact with, engaging, or clamping bodies of any shape* (US Patent: 1,059,545). United States Patent and Trademark Office.

19. Rudolf Joksch, & Oskar Berl. (1928). *Einspannvorrichtung zum Festhalten beliebig geformter Körper* (DE Patent: DE-456,034). Deutschen Patent- und Markenamts.

20. Rudolf Joksch, & Oskar Berl. (1928). *Einspannvorrichtung zum Festhalten beliebig geformter Körper* (DE Patent: DE-460,324). Deutschen Patent- und Markenamts.

21. Rudolf Joksch. (1929). *Gripping Device* (US Patent: 1,715,659). United States Patent and Trademark Office.

УДК 621.38(075.32) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.18

Д. О. ЛИЧОВ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту
та сучасної інженерії
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
ORCID: 0000-0002-3231-5985

Е. Г. САФАРОВ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри автомобільного транспорту
та сучасної інженерії
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
ORCID: 0000-0002-4584-5539

Т. В. ПЕТРЕНКО
старший викладач кафедри автомобільного транспорту
та сучасної інженерії
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
ORCID: 0000-0003-4733-4035

Р. Е. САФАРОВ
експерт сектора електронного автомобільного транспорту
європейського ринку
ORCID: 0009-0005-2426-1349

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ВАНТАЖНОГО ТРАНСПОРТУ

Повоєнний промисловий, аграрний, транзитний потенціал України, а також прагнення до євроінтеграції ставить перед країною амбітні завдання розвитку електричного транспорту. Особлива роль належить розвитку вантажного електротранспорту. У цьому важливо розвиток інфраструктурних проектів, співробітництво з операторами ринку, досконалість технологій і устаткування. Необхідно підготувати бізнес-проекти з урахуванням експортного та транзитного потенціалу регіонів, наявність електричних потужностей. ЄС активно рухається до декарбонізації транспортної галузі. З 2025 року набувають чинності європейські директиви, які встановлюють нові цілі щодо зниження вуглецевих викидів (CO_2 *emission reduction*). *Ця довгострокова централізована програма на рівні ЄС передбачає поступовий енергетичний перехід (energy transition) на кліматично-нейтральний транспорт та зниження викидів на 90 % на 2040 рік. З 2040 року 100 % нових великовантажних траків працюватимуть виключно на чистій енергії. Програма «Зелений курс ЄС» (Green Deal), що передбачає зниження викидів вуглекислого газу на 55 % до 2030 року, включає амбітні плани щодо переходу на електричний транспорт, включаючи важкі вантажні автомобілі. З переходом на електричні вантажівки, актуальність зарядних станцій цього виду транспорту значно зросла. Ефективність зарядних станцій залежить від багатьох факторів, включаючи потужність, швидкість заряду, безпеку та від інфраструктури, необхідної для повноцінної експлуатації таких станцій. У статті розглядаються особливості електрообладнання, що використовуються на таких станціях, та їх роль у забезпеченні надійної та швидкої зарядки електричних вантажівок.*

Ключові слова: *електричний транспорт, вантажний транспорт, акумулятор, зарядна станція.*

D. O. LYCHOV
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Road Transport
and Modern Engineering
Open International University of Human Development “Ukraine”
ORCID: 0000-0002-3231-5985

E. G. SAFAROV
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Road Transport
and Modern Engineering
Open International University of Human Development “Ukraine”
ORCID: 0000-0002-4584-5539

T. V. PETRENKO
Senior Lecturer at the Department of Road Transport
and Modern Engineering
Open International University of Human Development "Ukraine"
ORCID: 0000-0003-4733-4035

R. E. SAFAROV
European Union E-Mobility Expert
ORCID: 0009-0005-2426-1349

FEATURES OF ELECTRICAL EQUIPMENT FOR FREIGHT TRANSPORT CHARGING STATIONS

The post-war industrial, agricultural, and transit potential of Ukraine, as well as the desire for European integration, sets ambitious goals for the country in the development of electric transport. A special role belongs to the development of electric freight transport. The development of infrastructure projects, cooperation with market operators, and the perfection of technologies and equipment are important in this. It is necessary to prepare business projects taking into account the export and transit potential of the regions and the availability of electrical capacity. The EU is actively moving towards decarbonization of the transport industry. From 2025, European directives will come into force, setting new goals for reducing carbon emissions (CO_2 *emission reduction*)*. This long-term centralized program at the EU level provides for a gradual energy transition to climate-neutral transport and a 90 % reduction in emissions by 2040. From 2040, 100 % of new heavy-duty trucks will operate exclusively on clean energy. The EU Green Deal, which aims to reduce carbon dioxide emissions by 55 % by 2030, includes ambitious plans to transition to electric transport, including heavy goods vehicles. With the transition to electric trucks, the relevance of charging stations for this type of transport has increased significantly. The effectiveness of charging stations depends on many factors, including capacity, charging speed, safety and the infrastructure necessary for the full operation of such stations. The article examines the features of the electrical equipment used at such stations and their role in ensuring reliable and fast charging of electric trucks.*

Key words: *electric transport, freight transport, battery, charging station.*

Постановка проблеми

У ЄС зарядні станції для легкових автомобілів більш поширені, тоді як для вантажного електротранспорту почали з'являтися лише останніми роками, що суттєво впливає на інтерес до електричних вантажівок з боку державних та приватних ініціатив.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідження машин з електричною тягою показали, що саме перехід до більш екологічно чистого без шкідливих викидів машини – формула можливості до зменшення видобутку нафти та газу з подальшою їх переробкою. Використання акумуляторної батареє дає можливість об'єднати з двигуном внутрішнього згорання або повністю перейти на електричну рушійну силу.

На сьогодні багато науковців як в Україні, так і за кордоном дуже широко вивчають питання машин з електотягою. Зокрема, Будьонний О. В., Гладій Б. О., Гнатов А. В., Гончаров Ю. П., Дембіцький В. М., Кошель М. Д., Шевчук Я. В.

Формування мети дослідження

Метою роботи є вивчення особливостей зарядних станцій для вантажного електротранспорту та можливості їх розвитку в Україні.

Викладення основного матеріалу дослідження

Етапи розвитку легкового електротранспорту в ЄС:

• 2000–2010 рр. – Ринок електричного транспорту в ЄС лише починає розвиватись. У цей час електромобілі були переважно нішевими продуктами.

• 2010–2015 рр. – Поява масових моделей від таких компаній, як Nissan Leaf та Renault Zoe. У цих роках розпочинається прискорене зростання.

• 2015–2020 рр. – Істотне розширення моделей електромобілів, підтримка урядами країн ЄС (премії, субсидії). Збільшення продажів.

• 2020–2024 рр. – Активне зростання кількості реєстрацій електромобілів, підтримка у рамках Green Deal, розширення інфраструктури зарядних станцій.

Етапи розвитку вантажного електротранспорту:

• 2000–2015 рр. – Вантажні електричні автомобілі до ЄС на той момент практично відсутні.

• 2015–2020 рр. – Поява перших прототипів та невеликих серійних моделей для міських та регіональних перевезень.

• 2020–2024 рр. – Розвиток технологій, початок масового виробництва та продажу електричних вантажівок, таких як моделі від Tesla, Volvo, MAN, Scania, Mercedes-Benz.

У таблиці 1 показано динаміку зростання електротранспорту в ЄС з 2000 року.

Таблиця 1

Рік	Легкові електричні автомобілі (мільйони)	Вантажні електричні автомобілі (тисячі)
2000	0.01	0.0005
2005	0.02	0.001
2010	0.03	0.005
2015	0.2	0.02
2020	3.0	0.15
2021	4.0	0.25
2022	5.5	0.35
2023	7.0	0.45
2024	10.0	0.7

З графіка (рисунок 1) видно, суттєве зростання кількості вантажного електротранспорту у країнах ЄС починаючи з 2015 року.

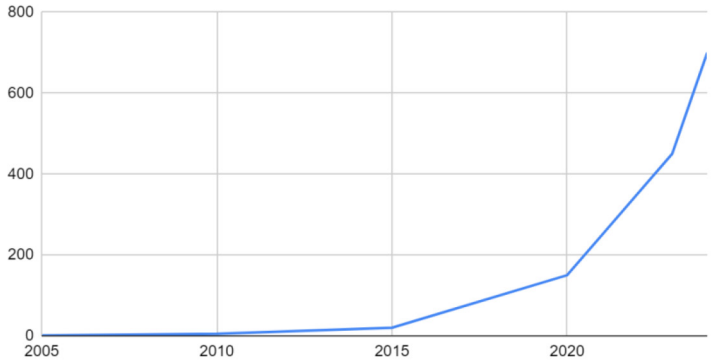


Рис. 1. Розвиток зарядних станцій для вантажного електротранспорту в ЄС та у Великоританії

У ЄС діє кілька великих ініціатив, спрямованих на створення та розвиток інфраструктури для заряджання електричних вантажівок:

1. European Alternative Fuels Infrastructure Directive (AFID): директива, спрямована на розвиток інфраструктури для альтернативних видів палива, включаючи електричні транспортні засоби.
2. Програми ELECTROMOBILITY, TEN-T та Horizon 2020 активно підтримують проекти зі створення зарядних станцій для електричних вантажівок.
3. Створення трансконтинентальних зарядних станцій для електронавантажувачів та електровозів, щоб підтримувати рух міжнародними транспортними коридорами.

У Європейському Союзі ситуація із зарядною інфраструктурою для вантажного електротранспорту розвивається завдяки кільком ключовим факторам.

1. Німеччина: компанія Ionity, яка є одним із найбільших операторів зарядних станцій у Європі, впроваджує мережі зарядних станцій для великих транспортних засобів, включаючи вантажівки. У 2022 році компанія почала розвивати інфраструктуру для електроповнопривідних великовантажних автомобілів.
2. Нідерланди: активно розробляються високошвидкісні зарядні станції для вантажівок у рамках масштабних ініціатив щодо зниження викидів.
3. Франція та Швеція – також ведуть розробку зарядних станцій для електричних вантажівок у рамках національних та трансєвропейських програм.
4. Німеччина, Франція, Нідерланди та інші країни створюють зарядну інфраструктуру для електричних вантажівок у рамках загальноєвропейської мережі (TEN-T).

Технічні особливості зарядних станцій для вантажного транспорту

У Європі активно впроваджуються технології для заряджання великих акумуляторів, здатні забезпечити зарядку з високою потужністю (до кількох мегават) та ефективне керування енергією. Основна увага приділяється:

1. Розробка високошвидкісних зарядних станцій, які можуть заряджати вантажні автомобілі за час від 30 хвилин до 1 години.
2. Інтеграції зарядних станцій з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячні панелі та вітрові установки.

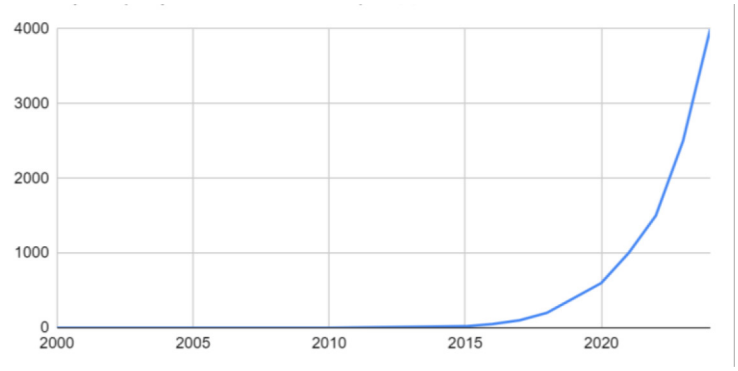


Рис. 2. Динаміка зростання електрозарядних станцій для вантажного транспорту в ЄС (2000–2024 рр.)

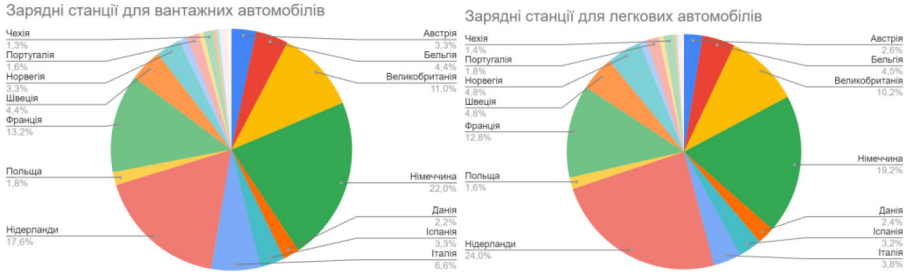


Рис. 3. Розподіл легкових та вантажних зарядних станцій у ЄС та Великобританії

Однією з основних відмінностей зарядних станцій для вантажного транспорту від станцій для легкових автомобілів є необхідність значної потужності зарядних пристроїв. Електричні вантажівки мають великі батареї, які вимагають більшого часу на зарядку, якщо потужності зарядних станцій недостатньо.

Потужність зарядних станцій для вантажного транспорту може досягати 1–3 МВт, що у кілька разів більше, ніж для легкових автомобілів. Це зумовлено необхідністю швидкої зарядки великих акумуляторів підтримки робочих характеристик транспортного засобу.

Існує кілька типів зарядних пристроїв, які можуть використовуватися для заряджання електричних вантажівок:

– швидкодіючі зарядні пристрої – забезпечують заряджання потужністю до 350 кВт і вище, що скорочує час заряджання до кількох годин;

– стандартні пристрої (AC та DC) – для повільного заряджання з потужністю до 50 кВт, придатного для нічних зарядок або в разі обмеженої інфраструктури.

Типи роз'ємів – для підключення можуть використовуватися різні стандарти, такі як CCS (Combined Charging System) або CHAdeMO, які мають бути сумісні з різними моделями транспортних засобів.

Основні характеристики зарядних пристроїв для вантажного транспорту наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Тип пристрою	Потужність	Час зарядки	Стандарт підключення
Швидкодіючий	до 350 кВт	1–2 години	CCS, CHAdeMO
Стандартне (AC/DC)	до 50 кВт	8–12 годин	CCS, Type 2
Ультрашвидке зарядне	до 1–3 МВт	менше 1 години	CCS

Зарядні станції для вантажівок мають високі вимоги до потужності та енергії. Для забезпечення стабільної роботи рекомендується використовувати резервні джерела живлення та враховувати можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії (наприклад, сонячні панелі).

Сучасні зарядні станції для вантажівок інтегруються з високотехнологічними системами керування, які контролюють процес зарядки. Це дозволяє:

– оптимізувати використання енергії в залежності від часу доби та рівня заряджання акумулятора;

– запобігати перевантаженню та знижувати витрати за рахунок ефективного розподілу навантаження.

Інфраструктура зарядних станцій має бути інтегрована в ширшу екосистему, яка охоплює:

– розвиток мереж зарядних станцій за основними транспортними маршрутами;

– роль операторів зарядних станцій у забезпеченні стабільної роботи;

– зв'язок із загальною енергосистемою та взаємодія з транспортними компаніями для оптимізації часу зарядки.

З кожним роком з'являються нові технології, які можуть значно покращити ефективність зарядних станцій:

– швидка зарядка – нові пристрої та системи можуть значно скоротити час заряджання;

– інтелектуальні системи управління – використання ІІ для прогнозування потреб в енергії;

– нові акумулятори – розробка ефективніших і довговічніших акумуляторів для більшого робочого діапазону.

Порівняння електроустаткування зарядних станцій для легкового та вантажного електротранспорту наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Характеристика	**Легковий транспорт**	**Вантажний транспорт#**
Потужність зарядної станції	7–22 кВт (для повільної зарядки) / 50–150 кВт (швидка зарядка)	350–1000 кВт (швидка зарядка) / до 3 МВт (ультравелика зарядка)
Типи зарядних пристроїв	AC (змінний струм), DC (постійний струм)	DC (постійний струм)
Швидкість заряджання	1–8 годин (AC), 30 хвилин – 1 година (DC)	1–2 години (суперзарядка)
Типи роз'ємів	Type 2, CCS, CHAdeMO	CCS (особливо для високої потужності)
Напруга мережі	220-400 В	400-800 В
Енергетичні потреби	Зазвичай до 100–200 кВт одну станцію	Потужність до 1–3 МВт для швидкого заряду великої кількості транспортних засобів
Резервне джерело	Не потрібно	Потрібна для забезпечення безперебійної роботи при високому навантаженні
Температурні вимоги	Від 0 °C до +40 °C	Від –20 °C до +50 °C
Системи керування	Прості системи моніторингу та управління	Розгорнуті системи з ШІ та прогнозуванням навантаження

Ця таблиця наочно демонструє, як відмінності у вимогах та характеристиках зарядних станцій для легкових та вантажних електротранспортних засобів впливають на проектування та експлуатацію цих станцій.

Прогнозування появи зарядних станцій для вантажного електротранспорту в Україні

Перспективи розвитку інфраструктури для зарядних станцій в Україні безпосередньо залежать від кількох ключових факторів, включаючи економічну та політичну ситуацію, розвиток законодавства, а також стратегію переходу до сталого транспорту на рівні держави.

Встановлення станцій зарядки для вантажного електротранспорту в Україні має кілька ключових факторів, які варто врахувати при виборі місць для їхнього розташування. у зарядній інфраструктурі для задоволення цих запитів.

Важливо, що:

1. Вантажні електричні автомобілі значно дорожчі за традиційні дизельні або бензинові аналоги, що гальмує їх масове поширення.

2. Менша економічна ефективність для власників транспортних компаній через дорожнечу акумуляторів та необхідність у значних капітальних вкладень в інфраструктуру зарядних станцій.

Кооперація з ЄС та міжнародні проєкти

Україна вже бере участь у низці міжнародних проєктів щодо впровадження стійких транспортних технологій. Це може сприяти розвитку зарядних станцій для вантажного транспорту:

1. Україна тісно співпрацює з ЄС, що створює можливості для отримання фінансових та технічних ресурсів для розвитку «зеленої» інфраструктури, у тому числі для зарядних станцій.

2. Програми підтримки транскордонних ініціатив, наприклад, для створення мережі зарядних станцій для електротранспорту маршрутами, що з'єднують Україну з Європою, можуть сприяти появі таких станцій і на території України.

Таким чином, хоча українська інфраструктура зарядних станцій для вантажного електротранспорту ще не розвинена, у перспективі очікується її поява та розвиток у найближчі 5–10 років. Це залежить від стимулювання попиту на електричні вантажівки, активної державної підтримки та подальшого інтегрування України до європейської «зеленої» економіки.

Поява зарядних станцій для вантажного електротранспорту в Україні найближчими роками ймовірна, особливо з урахуванням міжнародних трендів та зусиль з інтеграції України до Європейського Союзу. Проте, для цього потрібний розвиток відповідної інфраструктури, стимуляція попиту на електричні вантажівки та підтримка з боку держави.

Висновки

Зарядні станції для вантажного транспорту є важливим елементом у переході до електрифікованого транспорту. Розвиток електроустаткування для таких станцій потребує комплексного підходу, включаючи вибір потужних трансформаторів, високоякісних перетворювачів та надійних систем захисту. У майбутньому очікується значний прогрес у галузі швидкої зарядки та технологій управління енергією.

Список використаної літератури

1. Личов Д. О., Петренко Т. В., Сафаров Е. Г. (2023) Використання електробусів на автотранс портних підприємствах. Вісник ХНТУ № 3(86), С. 33–38.
2. Макогон С. Електромобілі – майбутнє, метан – теперишнє. Як швидко покращити ситуацію із забрудненням повітря в Україні. URL: https://nv.ua/ukr/biz/experts/gaz-na-avto-gbo-ekonomichnodlya-vlasnikiv-chisto-dlya-navkolishnogo-seredovishcha-vigidno-dlya-ukrajini-50036086.html (дата звернення: 06.01.2025).
3. Китайська компанія BYD зі своїми електробусами вийшла на ринок Німеччини. URL: https://elektrovesti.net/67826_kitayskaya-kompaniya-byd-so-svoimi-elektrobusami-vyshla-narynokge- rmanii (дата звернення: 06.01.2025).
4. Сафаров Р. Електрифікація логістики. Потрібно готуватися. https://logist.fm/pub lications/elektrifikaciya-logistiki-potribno-gotuvatisya (дата звернення:06.01.2025).

References

1. Lychov D. O., Petrenko T. V., Safarov E. G. (2023) Vykorystannja elektrobusiv na avtotransportnykh pidpryjemstvakh [Power supply of electric buses in motor transport enterprises]. Visnyk_kntu, no. 3(86), pp. 33–38.
2. Makogon S. (2019). Electric cars are the future, methane is the present. How to improve the air pollution situationin Ukraine quickly. Retrieved from: https://nv.ua/eng/biz/experts/gaz-na-avto-gboekonomichno-dlya-vlasnikiv-chistodlya-navkolishnogo-seredovishcha-vigidno-dlya-ukraine- 50036086.html (Accessed: 26.09.2023).
3. Electrovesti.net (2019). BYD Chinese Company Launches German Market with its Buses. Retrieved from: https://elektrovesti.net/67826_kitayskaya-kompaniya-byd-so-svoimi-elektrobusami-vyshlana-rynok-germanii (Accessed:26.09.2023).
4. Safarov R. (2024). Elektryfikacija loghistyky. Potribno ghotuvatysja [Electrification of logistics. We need to prepare]. Logist.fm/pub lications /elektrifikaciya-logistiki-potribno-gotuvatisya(Accessed:06.01.2025).

УДК 543.37: 544.076.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.19

О. В. ЛІНЮЧЕВА
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4181-5946

О. С. БУТЕНКО
аспірант кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4181-5946

ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНИЙ СЕНСОР РОЗЧИНЕНОГО У ВОДІ КИСНЮ З ДОДАТКОВИМ ЦИНКОВИМ ЕЛЕКТРОДОМ ДЛЯ ПОНОВЛЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ МІДНОГО АНОДА

У даній роботі розглянута потреба в сенсорах кисню для моніторингу водного середовища, які при відносній дешевизні потребують мінімальних експлуатаційних витрат, а також відрізняються екологічністю та високою надійністю. Таким вимогам найбільше відповідають амперометричні сенсори двоелектродної системи, які відрізняються зручним для реєстрації струмовим сигналом з лінійною його залежністю від концентрації визначуваного компонента, а також високою надійністю і стійкістю до перевантажень. Проте найбільш поширеною електрохімічною системою таких сенсорів для визначення кисню є елемент Кларка зі свинцевим анодом. За сучасних тенденцій до екологізації техніки, застосування свинцю у витратних комплектуючих вважається неприпустимим. Відомі роботи щодо заміни свинцевих анодів на мідні, проте надійність їх роботи з часом виявилася нижчою, ніж у свинцевих. У роботі вирішена задача розробки амперометричного сенсора кисню двоелектродної системи, який генерує аналітичний струмовий сигнал без підводу додаткової електроенергії із-зовні, тобто є по суті хімічним джерелом струму нановатної потужності. Вимірювання кисню ведеться за амперометричним принципом на срібному робочому електроді, потенціал якому задає закорочений на нього мідний допоміжний електрод. Тобто, сенсор не містить високотоксичного свинцю, який замінений на мідь. Дослідна електрохімічна комірка сенсора просочена слабо практично нейтральним 0.05М розчином гідрокарбонату натрію з метою ускладнення умов функціонування мідного допоміжного електрода, який починав пасивуватися приблизно через дві доби неперервного вимірювання кисню у воді. Поновлення працездатності мідного допоміжного електрода у випадку його пасивації проводилося його закорочуванням на другий допоміжний електрод сенсора – цинковий, який експлуатується тільки для зняття або запобігання пасивації. Запропоновано режим експлуатації такого двоелектродного сенсора з додатковим цинковим допоміжним електродом, який дозволяє уникати пасивації мідного електрода й погіршення технічних характеристик сенсора, а також не потребує як додаткового електричного живлення, так і ускладнення необхідних вторинних електронних пристроїв.

Ключові слова: *електрохімічний сенсор, розчинений кисень, мідний анод, додатковий цинковий електрод, екологічно безпечний, зняття пасивації.*

O. V. LINYUCHEVA
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Electrochemical Production Technology
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-4181-5946

O. S. BUTENKO
Postgraduate Student at the Department of Electrochemical Production Technology
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-4181-5946

ECOLOGICALLY SAFE DISSOLVED OXYGEN SENSOR WITH AN ADDITIONAL ZINC ELECTRODE TO RESTORE THE FUNCTIONALIT OF THE COPPER ANODE

This work considers the need for oxygen sensors for monitoring the aquatic environment, which, while relatively cheap, require minimal operating costs, and are also environmentally friendly and highly reliable. These requirements are best met by amperometric sensors of a two-electrode system, which are distinguished by a current signal that is convenient to register with its linear dependence on the concentration of the component being determined, as well as high reliability and resistance to overloads. However, the most common electrochemical system of such sensors for determining oxygen is the Clark element with a lead anode. Given modern trends in the environmental friendliness of technology, the use of lead in consumable components is considered unacceptable. There are works on replacing lead anodes with copper ones, but their reliability over time turned out to be lower than that of lead ones.

The work solves the problem of developing an amperometric oxygen sensor of a two-electrode system that generates an analytical current signal without supplying additional electricity from the outside, that is, it is essentially a chemical source of current of nanowatt power. Oxygen is measured according to the amperometric principle on a silver working electrode, the potential of which is set by a copper auxiliary electrode shorted to it. That is, the sensor does not contain highly toxic lead, which is replaced by copper. The experimental electrochemical cell of the sensor is impregnated with a weak, practically neutral 0.05M solution of sodium bicarbonate in order to complicate the operating conditions of the copper auxiliary electrode, which began to passivate after approximately two days of continuous measurement of oxygen in water. The restoration of the operability of the copper auxiliary electrode in the event of its passivation was carried out by shorting it to the second auxiliary electrode of the sensor – zinc, which is operated only to remove or prevent passivation. An operating mode of such a two-electrode sensor with an additional zinc auxiliary electrode is proposed, which allows to avoid passivation of the copper electrode and deterioration of the technical characteristics of the sensor, and also does not require either additional electrical power or the complication of the necessary secondary electronic devices.

Key words: *electrochemical sensor, dissolved oxygen, copper anode, additional zinc electrode, environmentally friendly, removal of passivation.*

Постановка проблеми

Важливість визначення кисню у водному середовищі зростає щороку як з огляду на потреби агропромислового комплексу, так і задля забезпечення щойно розроблених технологій, у яких розчинений у воді кисень використовується як основний реагент [1]. Проте до сьогодні не існує універсального сенсора, який би задовольняв всім вимогам, включаючи низьку вартість й тривалий термін служби.

Собівартість аналітичного приладу для визначення кисню у воді складається власне з його собіватості та вартості його атестації як відповідного засобу опосередкованих вимірювань, причому питання атестації лежить за межами наукових інтересів. Чиста собівартість засобу вимірювання кисню у воді складається з собівартостей, по-перше, первинного перетворювача концентрації кисню в аналітичний сигнал, по-друге, відповідного електронного пристрою, для реєстрації цього сигналу та, по-третє, джерела його живлення.

Таким чином, бажано розроблювати сенсор, експлуатація якого передбачає мінімальних витрат – потребує максимально спрощеного й енергоекономного обладнання. На сьогодні найпростішим лишається реєстрація аналітичного сигналу електричної природи, внаслідок чого перевагу варто віддавати електрохімічним та напівпровідниковим сенсорам.

Вартість електрохімічних сенсорів, особливо амперометричного типу, є відносно високою, у порівнянні з сучасними оптичними чи напівпровідниковими сенсорами, проте у електрохімічних сенсорів є дві принципово важливі переваги: по-перше, простота реєстрації й інтерпретації аналітичного сигналу електричної природи, по-друге, висока стійкість до перевантажень за концентраціями як визначуваного компонента, так і сторонніх речовин в аналізованому середовищі [2].

Останнім часом росте вартість електронних комплектуючих та літій-іонних акумуляторів внаслідок проблем з сировинною, логістикою, скороченням виробничих потужностей і зменшенням числа доступного кваліфікованого персоналу. Тому вимога спрощення схем вимірювання сигналу сенсорів стимулює до розробки саме електрохімічних сенсорів амперометричного типу з двоелектродною системою генерування струмового сигналу. Такі сенсори вимагають найпростішого обладнання для реєстрації сигналу – по суті, мікроамперметра, оскільки їх струмовий сигнал є прямопропорційним до концентрації визначуваної речовини. Триелектродні системи такого типу (з електродом порівняння) вимагають значно складнішого вторинного електронного обладнання [2]. При цьому, двоелектродні сенсори (гальванічного типу) є по суті малопотужними хімічними джерелами струму, завдяки чому генерування ними сигналу не споживає електроенергію від зовнішніх джерел. Тоді як в триелектродних системах струмовий сигнал – це по суті струм електролізу під дією зовнішнього джерела енергії. Відповідно, пристрої на основі двоелектродних сенсорів споживають на порядок менше електроенергії при роботі, порівняно з такими, що засновані на триелектродних сенсорах. Тобто, пристрої на двоелектродних сенсорах потребують значено дешевших акумуляторів для автономної роботи.

Широко відомий елемент Кларка, як двоелектродний сенсор кисню у воді системи «платина – розчин КОН – свинець», в різноманітних конструктивних оформленнях до останнього часу активно використовувався як електрохімічний осередок сенсорів кисню для визначення цього газу як у вільному стані у газових сумішах, так і в розчиненому вигляді у воді [2]. Проте по мірі поширення світового тренду щодо глобального захисту біосфери від надмірного антропогенного тиску, у приладобудуванні намітилася тенденція відмови від витратних комплектуючих, які містять свинець, з огляду на його високу токсичність.

Таким чином, існує потреба в сенсорах кисню для моніторингу водного середовища, які при відносній дешевизні потребують мінімальних експлуатаційних витрат, а також відрізняються екологічністю та високою надійністю. Таким вимогам найбільше відповідають амперометричні сенсори двоелектродної системи, проте найбільш поширеними з них є системи зі свинцевими допоміжними електродами, які не відповідають вимогам екологів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасна тенденція до відмови від свинцю має чисто маркетинговий характер, оскільки спеціально проведені теоретичні дослідження показали, що з сенсорів, або з аналітичних приладів, свинець в аналізоване середовище потрапити не може. А експерименти показали, що після неперервних тривалих вимірювань іони свинцю в аналізовані води не вдавалося виявити найчутливішими методами аналізу [3]. Зважимо, що при цьому загальна кількість таких приладів на ринку надто мала, щоб спричинити скільки-небуть помітне розсіювання цього високотоксичного важкого металу. До того ж, персонал, який експлуатує такі прилади, може бути у дуже простий спосіб вмотивований здавати виробникові назад відпрацьовані свинець-місткі елементи обладнання: достатньо виробникові забезпечити клієнтам знижку при закупівлі нових комплектуючих в обмін на відпрацьовані. Виробника ж можна зобов'язати до такого підходу створенням відповідного юридичного поля.

Оскільки ніяких логічних, науково обумовлених кроків стосовно регламенту використання свинцю зроблено не було, то на кафедрі технології електрохімічних виробництв було зроблено успішну спробу заміни свинцю на умовно менш токсичну мідь [4]. Проте, не зважаючи на її повну теоретичну й термодинамічну відповідність поставленій задачі заміни свинцю, мідь іноді починає пасивуватися, внаслідок чого у амперометричного сенсора різко знижується швидкодія.

Формулювання мети дослідження

Поставлена задача розробки електрохімічного осередка амперометричного сенсора кисню гальванічного типу, з робочим (наприклад, срібним) і допоміжним мідний електродом, для якого вирішена проблема зниження активності внаслідок пасивації. При цьому має бути незмінним нульове енергоспоживання розробленої комірки як при генеруванні аналітичного струмового сигналу, так і при виконанні заходів із забезпечення активації мідного анода.

Можливість електрохімічної активації пасивованої міді шляхом її катодної поляризації виглядає достатньо очевидним рішенням, особливо якщо її потенціал змістити в негативний бік до інтенсивного виділення водню з води. При цьому відбудеться часткове відновлення сполук міді на її поверхні та їх частковий відрив від поверхні бульбашками водню. Недолік такого підходу до активації мідного аноду в рамках поставленої задачі є очевидним – значні витрати електроенергії на фарадеївські процеси, особливо на електрохімічне розкладання води, що має суттєво розряджати акумуляторну батарею й знижувати автономність аналітичного пристрою.

Додатковим недоліком описаного вище способу активації мідного допоміжного електрода є анодна пасивація срібного робочого електрода під час цієї процедури. Розрахунки й попередні дослідження показали, що анодна поляризація срібла, достатньо тривала для активації мідного допоміжного електрода, в умовах прісних вод з природною солоністю струмом у кілька мікроампер викликає забруднення поверхні робочого електрода малорозчинними солями срібла, які зменшують як площу активної поверхні робочого електрода, так і його поляризованість, внаслідок чого спочатку різко знижується швидкодія сенсора (за умови його функціонування у режимі дифузійних обмежень струму відновлення кисню), а надалі сенсор повністю виходить з ладу й потребує хімічної очистки поверхні.

Таким чином, постає технічне протиріччя: з одного боку, електрохімічний осередок сенсора має лишатися двоелектродним, тобто амперометричним сенсором кисню саме гальванічного типу, який генерує струмовий сигнал відновлення кисню на срібному катоді за рахунок спряженого окиснення мідного анода, що забезпечує нульові витрати енергії з боку сенсора на проведення аналізу; з іншого боку, періодична активація мідного анода має перебігати без витрат струму з боку електронної складової аналітичного приладу й не застосовувати срібний робочий електрод як протиелектрод у процесі електрохімічної активації. Рішення з застосуванням хімічної та механічної очистки поверхні міді й срібла при цьому розглядати взагалі немає сенсу, внаслідок очевидно надмірного ускладнення конструкції.

Метою даного дослідження була розробка електрохімічних заходів зняття пасивації мідного анода сенсора кисню при збереженні простоти електронного обладнання й недопущення використання для цього енергії від зовнішніх (по відношенню до сенсора) джерел.

Методика досліджень

Вперше запропоноване електрохімічне рішення для досягнення поставленої мети – застосування триелектродної схеми електрохімічного осередку зі срібним робочим електродом і двома допоміжними електродами – мідним

і цинковим. У такій електрохімічній комірці перший ланцюг «срібний робочий електрод – мідний допоміжний електрод» застосовується для генерування аналітичного струмового сигналу на розчинений у воді кисень. Замикання ж мідного і цинкового допоміжних електродів проводиться у період між вимірюваннями й утворює другий ланцюг між мідним і цинковим електродами. При цьому мідь виступає як катод по відношенню до цинку. З огляду на термодинаміку цього процесу, на міді за потенціалу корозії цинку має дуже повільно виділятися водень й відновлюватися сполуки міді. Необхідна експериментальна перевірка можливості активації міді у таких умовах.

Для дослідів спеціально виготовили вперше запропоновану електрохімічну комірку, допоміжний електрод 2 (рис. 1) якої виготовляли із зачищеного й протравленого мідного дроту товщиною 0.5 мм. Цей мідний дріт навивали спірально у два шари на цинкову пластинку 3 товщиною 0.5 мм і шириною 3 мм. Між цинковою пластинкою 3 та мідним анодом 2 розміщували гідрофільний сепаратор 4 із волокнистого поліпропілену, який навивали на цинковий допоміжний електрод 3, перед тим, як навивати на нього дріт мідного допоміжного електрода 2. Останній також огортали гідрофільним сепаратором 4 із волокнистого поліпропілену, поверх якого навивали срібну дротинку товщиною 0.05 мм, яка відігравала роль робочого електрода 1. Струмопідводами робочого 1 і допоміжного 2 електродів слугувало просте подовження дроту, з якого вони були виготовлені.

Струмопідвод 5 до цинкового допоміжного електрода 3 виготовляли з тонкого (діаметром 0.1 мм) мідного дроту в поліхлорвініловій ізоляції. Цей струмопідвід кріпили до цинкової пластинки 3 перед виготовленням сенсора. Один кінець такого дроту 5 зачищали на 3 мм від ізоляції і протравлювали, а потім ретельно сушили, у т.ч. феном. Аналогічно готували один кінець цинкової пластинки 3, яким огортали й затискували пасатижами абізольований кінець струмопідвода 5. Місце контакту ізолювали епоксидним клеєм та термоусадочною ізоляційною трубкою. Такої ізоляції контакту різнорідних металів вистачало на 4…6 тижнів експериментів. Очевидно, що перед впровадженням таких сенсорів у виробництво цей контактний вузол 7 (рис. 1) необхідно буде доопрацювати.

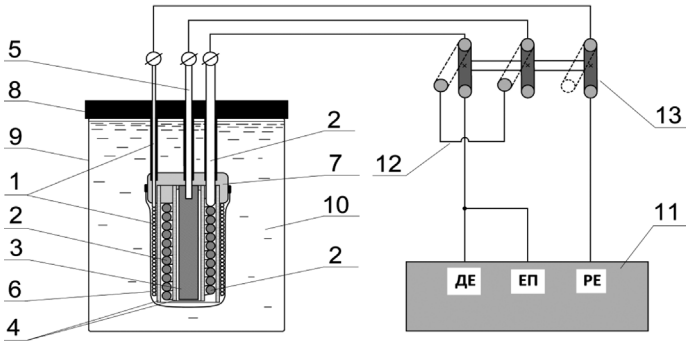


Рис. 1. Схема дослідної установки: 1 – срібний робочий електрод; 2 – мідний допоміжний електрод; 3 – цинковий допоміжний електрод; 4 – гідрофільний сепаратор з волокнистого поліпропілену; 5 – струмопідвод цинкового електрода; 6 – поліетиленова мембрана; 7 – вузол герметизації контактів сенсора; 8 – стандартна сталева кришка-закрутка для банок від 0.5 л; 9 – скляна ємність (стандартна банка на 0.5 л); 10 – аналізований розчин; 11 – потенціостат; 12 – шунт для закорочування допоміжних електродів 2 і 3 при зберіганні сенсорної комірки; 13 – пакетний перемикач

Виготовлену комірку огортали поліетиленовою упаковочною плівкою як мембраною 6, верхню частину якої фіксували біля виходу струмопідводів епоксидним клеєм, а нижню запаювали після того, як комірку просочували 0.005 М водним розчином $NaHCO_3$, що слугував її електролітом. Майже нейтральний слаболужний розчин застосували задля того, щоб ускладнити роботу мідного допоміжного електрода 2 й гарантовано досягти його часткової пасивації за відносно короткий час експлуатації, не чекаючи доки пасивація наступить спонтанно. Більш концентровані розчини не використовували, щоб уникнути пошкодження мембрани осмотичним тиском, а також не допустити надмірної активації цинкового електрода, хоча вважається, що цинк є досить стабільним до pH12.

Досліди проводили з застосуванням потенціостату VersaSTAT 3 AMETEK 11 у режимі потенціостатичної поляризації робочого електрода 1 по відношенню до допоміжного електрода 2, який одночасно слугував і електродом порівняння. Для цього виходи потенціостата 11, марковані як виходи на допоміжний і порівняльний електроди, закорочували на струмопідвод мідного допоміжного електрода 2.

Аналізованим середовищем слугувала водопровідна вода, яку відстоювали у відкритій ємності для вирівнювання температури з лабораторною і насичення води киснем до максимуму за даної температури. Таке середовище слугувало для визначення перехідної характеристики сенсорної комірки на максимально можливу концентрацію кисню у воді.

Як середовище без кисню використовували 0.01 М розчин сульфіту натрію, який в герметичній ємності без газової фази попередньо прогрівали 1 год при температурі 85 °С для кількісного відновлення кисню за реакцією

$$2Na_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4. \quad (1)$$

Вміст сульфіту у розчині переважає еквівалентний максимально можливий вміст кисню за рівнянням (1) на порядок. Далі розчин в герметичній ємності охолоджували до температури у лабораторії.

Поляризацію робочого електрода проводили з нульовим зміщенням по відношенню до мідного допоміжного електрода. Температура 20 °С.

Результати експериментів та їх обговорення

Спершу встановлювали величину фонового струму дослідної комірки у розчині без кисню, для чого сенсорну комірку виймали з розчину для зберігання (0.005 М гідрокарбонат натрію), відкручували кришку з банки з розчином без кисню й щільно закручували в неї кришку 8 (рис. 1) з дослідною коміркою на струмопідводах. Після цього потенціостат реєстрував перехідну характеристику падіння сили струму відновлення кисню (крива 1 рис. 2) до встановлення стабільного значення близько 0.5 мкА. Досить велике значення умовного фонового струму обумовлена недосконалістю методики експерименту, внаслідок чого деяка кількість кисню потрапляє в дослідну ємність 9 (рис. 1) при її відкриванні й внесенні кисню разом з розчином у вигляді шару Прандля на поверхні мембрани 6 (рис. 1).

Надалі сенсорну комірку виймали з ємності 9 (рис. 1) й занурювали у відкриту ємність об'ємом 1 л, наповнену вільно аерованою водопровідною водою. Сигнал сенсора швидко зростав за кривою 2 (рис. 2). Повторне занурення сенсора в розчин сульфіту натрію з наступним внесення в аеровану воду дав криву 3, яка цілком співпадає з кривою 2 (рис. 2). Після чого сенсор лишали неперервно відпрацьовувати сталий струмовий сигнал протягом доби.

Через добу повторювали дослід за попередньою методикою й частіше за все одержували перехідну характеристику ідентичну кривим 2 і 3 (рис. 2). Через дві-три доби вихід сигналу сенсора на плато гарантовано ставав повільніше (крива 4 рис. 2). Це вказує на зростання анодної поляризації мідного допоміжного електрода, внаслідок чого зростає потенціал катодного відновлення кисню й відповідно зростає тривалість досягнення нульової концентрації кисню на межі поділу електрод-електроліт, що визначає тривалість перехідного процесу.

Після цього розпочинали дослід з катодного поновлення функціональності мідного допоміжного електрода.

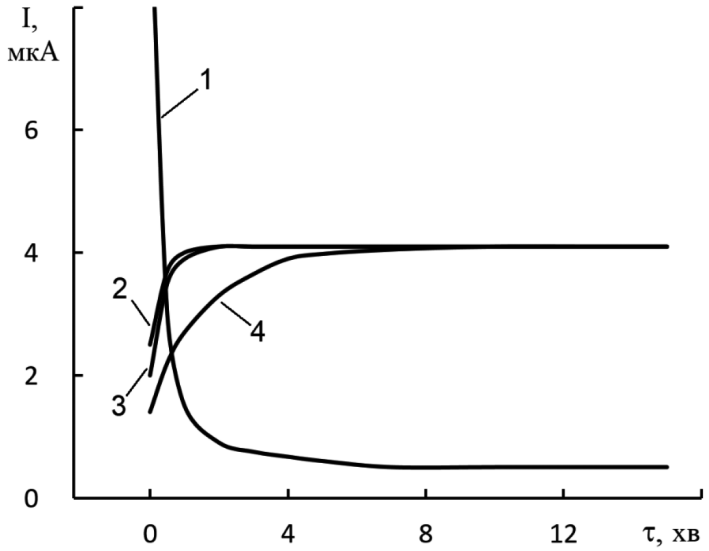


Рис. 2. Перехідні характеристики амперометричного сенсора кисню у двоелектродному режимі (срібний робочий і мідний допоміжний електроди) у водному середовищі: 1 – встановлення фонового струму у розчині 0.01 М сульфіту натрію; 2–4 – встановлення струмового сигналу на розчинений у аерованій воді кисень після перебування в середовищі без кисню протягом фіксації кривої 1; 2, 3 – послідовно у перший день після виготовлення сенсора; 4 – після двох діб неперервного генерування сигналу в аерованій воді

Для цього струмопідводи мідного 2 і цинкового 3 допоміжних електродів закорочували з допомогою пакетного перемикача 13 (рис. 1) між собою або на мікроамперметр, щоб визначити силу струму, яка перебігає у цьому процесі. Встановлено, що в даних умовах сила катодного струму на мідному допоміжному електроді не переважає 0.1 мкА. Ланцюг між срібним робочим (п. 1 рис. 1) і мідним допоміжним (п. 2 рис. 1) при цьому обов'язково тримали розімкнутим.

Допоміжні електроди лишали закороченими протягом 1, 24 та 48 годин після дводобового безперервного генерування струмового сигналу відновлення кисню. На рис. 3 наведено перехідні характеристики, одержані в цих дослідах (криві 2–4), з яких видно, що лише після дводобової катодної обробки мідного електрода у контакті з цинковим вдається подолати його пасивацію, яка є наслідком безперервного генерування струмового сигналу на розчинений кисень протягом двох діб.

Подальшими дослідами встановлено, що задля уникнення пасивації мідного допоміжного електрода достатньо притримуватися наступного режиму експлуатації сенсорної комірки: 1 – неперервне вимірювання до 30 хв; 2 – розривання ланцюга «срібний робочий – мідний допоміжний електроди»; 3 – закорочування допоміжних мідного і цинкового електродів на 5…15 хв; 4 – продовження вимірювань або розмикання всіх електричних ланцюгів із сенсором для його зберігання у водному розчині електроліту, аналогічному внутрішньому електроліту сенсора. Після такого режиму експлуатації сенсор готовий до роботи у будь-який момент часу за виключенням більш тривалих перерв у роботі, після яких бажано закоротити допоміжні електроди на 15 хв перед роботою.

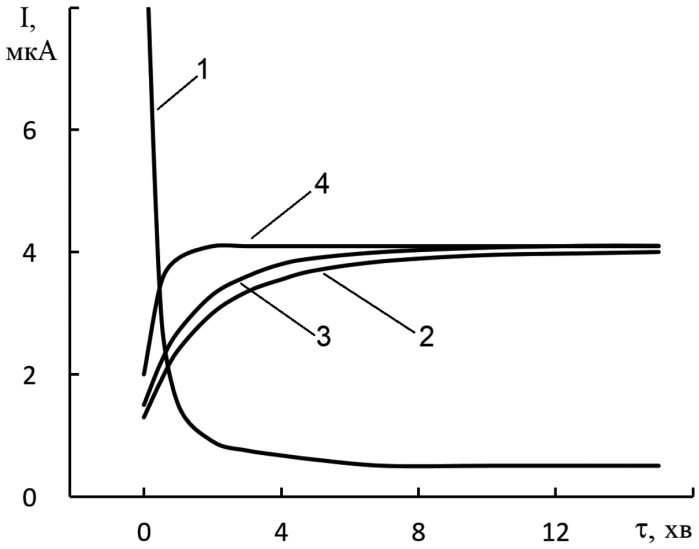


Рис. 3. Перехідні характеристики амперометричного сенсора кисню у двоелектродному режимі (срібний робочий і мідний допоміжний електроди) у водному середовищі після відновлення функцій мідного допоміжного електрода закорочуванням із цинковим допоміжним електродом: 1 – встановлення фонового струму у розчині 0.01 М сульфіту натрію; 2–4 – встановлення струмового сигналу на розчинений у аерованій воді кисень після перебування в середовищі без кисню протягом фіксації кривої 1; 2–4 – криві зняті після закорочування мідного і цинкового допоміжних електродів протягом відповідно 1, 24 і 48 годин

Висновки

Вирішена задача розробки амперометричного сенсора кисню двоелектродної системи, який генерує аналітичний струмовий сигнал без підводу додаткової електроенергії із-зовні, тобто є по суті хімічним джерелом струму нановатної потужності. У сенсорі не міститься високотоксичного свинцю, який замінений на мідь і цинк. При цьому, працездатність мідного допоміжного електрода у випадку його пасивації поновлюється його закорочуванням на другий допоміжний електрод сенсора – цинковий, який експлуатується тільки для зняття або запобігання пасивації. Запропоновано режим експлуатації такого двоелектродного сенсора (гальванічного типу) з додатковим цинковим допоміжним електродом, який дозволяє уникати пасивації мідного електрода й погіршення технічних характеристик сенсора.

Список використаної літератури

1. Кузнєцов С. І., Венгер О. О, Безпальченко О. М., Семенченко О. О., Івкіна Є. С., *Окиснення оксидів нітрогену киснем в рідкій фазі*, № 4(87) (2023): Вісник Херсонського національного технічного університету, С. 70–76.

2. Чвірук В. П., Поляков С. Г., Герасименко Ю. С. Електрохімічний моніторинг техногенних середовищ: монографія : Академперіодика, Kyiv : 2007. 324 с. ISBN : 978-966-360-067-3.

3. Лабзова О. О., Букет О. І., Бутенко О. С. The XIV International Scientific and Practical Conference «Prospects for the development of science and the environment. *Екологічна безпека свинцевого анода сенсора розчиненого у воді кисню*]. Матеріали міжнар. наук.-практ. конф., м. Хелесінкі, Фінляндія – 10 квітня 2023. – 415 С., С. 65–66. ISBN – 9-789-40368-863-3.

4. Buket O.I., Vashchenko O.M. Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry. *Copper as a replacement of lead as an anodic material of galvanic oxygen sensor* / під ред. V.Z.Barsukov / Монографія Kyiv : KNUTD, 2019. С. 152–160. ISBN 978-617-7506-48-4.

References

1. Kuznetsov S.I., Wenger O.O., Bezpalchenko O.M., Semenchenko O.O., Ivkina E.S., (2023): [Okysnennia oksydiv nitrohenu kysnem v ridkii fazi] Oxidation of nitrogen oxides by oxygen in the liquid phase, *Visnyk khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. Kherson : Bulletin of the Kherson National Technical University, No. 4(87) (2023) pp. 70–76.

2. Chviruk V.P., Polyakov S.G., Gerasimenko Y.S. (2007) *Elektrokhimichnyi monitorynh tekhnohennykh seredovyshch* [Electrochemical monitoring of technogenic environments] monograph. Kyiv : Akademperiodika, (in Ukrainian) ISBN: 978-966-360-067-3.

3. Labzova O.O., Buket O.I., Butenko O.S. 10 April 2023 Ekolohichna bezpeka svyntsevoho anoda sensora rozchynenoho u vodi kysniu [Environmental safety of lead anode of oxygen sensor dissolved in water] The XIV International Scientific and Practical Conference “Prospects for the development of science and the environment” (Helsinki, Finland) P. 65–66. ISBN – 9-789-40368-863-4.

4. Buket O.I., Vashchenko O.M. (2019) *Copper as a replacement of lead as an anodic material of galvanic oxygen sensor* [Copper as a replacement of lead as an anodic material of galvanic oxygen sensor] *Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry* Promising Materials and Processes in Applied Electrochemistry Monograph / editor-in-chief V.Z.Barsukov. Kyiv : KNUTD, pp. 152–160. ISBN 978-617-7506-48-4.

UDC 681.3:681.5:658.5 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.20

I. SH. NEVLIUDOV
Doctor of Engineering Science, Professor,
Head of Department of Computer-Integrated Technologies,
Automation and Robotics
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-9837-2309

V. V. YEVSIEYEV
Doctor of Engineering Science, Professor,
Professor at the Department of Computer-Integrated Technologies,
Automation and Robotics
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-2590-7085

D. V. GURIN
Senior Lecturer at the Department of Computer-Integrated Technologies,
Automation and Robotics
Kharkiv National University of Radio Electronics
ORCID: 0000-0002-9837-2309

MATHEMATICAL MODEL OF BLOCK PROCESS PLANNING IN SYSTEMS OF ALLOCATION OF TASK BETWEEN PEOPLE AND COLLABORATIVE ROBOTS IN THE FRAMEWORK OF INDUSTRIES 5.0

This article considers the current problem of task allocation between humans and collaborative robots in the context of Industry 5.0 using block process planning. The main focus is on analyzing the interaction between operators and automated systems operating in a shared production environment. The main goal is to ensure harmonious cooperation between humans and robots by optimizing task allocation, taking into account a number of important factors, such as time and resource constraints, the complexity of the operations performed, the level of autonomy of robotic systems, and the priority of performing different stages of production. As part of the study, a mathematical model is proposed that includes cost and benefit functions that allow assessing x1the effectiveness of planning. The model also contains numerous time and resource constraints that are critical to maintaining the productivity, safety, and flexibility of modern production systems. To verify its operability, software in Python was developed that allows not only to automatically carry out the planning process, but also to evaluate the overall effectiveness of the proposed task allocation strategies. The conducted experimental studies have shown that the success of planning depends to a large extent on the balance of time and resource parameters. The conducted experiments have shown that the success of planning depends on the balance of time and resource parameters: at values and all constraints are met, and the cost function fluctuates within 30–80. In contrast, in the case of insufficient resources, the system exhibits increased sensitivity, which makes the performance of some tasks impossible or inefficient. The results obtained confirm that the developed model is resistant to parameter changes and provides optimal task distribution in most production scenarios. Prospects for further research include extending the model for dynamic environments, integrating machine learning algorithms for forecasting, and improving the adaptive planning process.

Key words: *block process planning, task allocation, collaborative robots, Industry 5.0, optimization, cost function, resource constraints.*

І. Ш. НЕВЛЮДОВ
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та робототехніки
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-9837-2309

В. В. ЄВСЄЄВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та робототехніки
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-2590-7085

Д. В. ГУРІН
старший викладач кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації та робототехніки
Харківський національний університет радіоелектроніки
ORCID: 0000-0002-2272-5227

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЛОЧНОГО ПРОЦЕСНОГО ПЛАНУВАННЯ В СИСТЕМАХ АЛОКАЦІЇ ЗАВДАНЬ МІЖ ЛЮДЬМИ ТА КАЛАБОРАТІВНИМИ РОБОТАМИ В РАМКАХ ІНДУСТРІЙ 5.0

У даній статті розглянуто актуальну проблему алокації завдань між людьми та колаборативними роботами в умовах Індустрії 5.0 з використанням блочного процесного планування. Основна увага приділяється аналізу взаємодії між операторами та автоматизованими системами, що працюють у спільному виробничому середовищі. Основною метою є забезпечення гармонійної співпраці між людьми та роботами шляхом оптимізації розподілу завдань з урахуванням низки важливих факторів, таких як часові та ресурсні обмеження, складність виконуваних операцій, рівень автономності роботизованих систем, а також пріоритетність виконання різних етапів виробництва. У рамках дослідження запропоновано математичну модель, яка включає функції вартості та вигідності, що дозволяють оцінити ефективність планування. Модель також містить численні обмеження на час і ресурси, що є критично важливими для підтримки продуктивності, безпеки та гнучкості сучасних виробничих систем. Для перевірки її працездатності було розроблено програмне забезпечення на мові Python, яке дозволяє не лише автоматично здійснювати процес планування, але й оцінювати загальну ефективність запропонованих стратегій розподілу завдань. Проведені експериментальні дослідження продемонстрували, що успішність планування значною мірою залежить від збалансованості часових і ресурсних параметрів. Проведені експерименти показали, що успішність планування залежить від збалансованості часових і ресурсних параметрів: при значеннях $T_{max} \geq 5$ і $R_{max} \geq 7$ всі обмеження виконуються, а функція вартості коливається в межах 30–80. Натомість у разі недостатності ресурсів система виявляє підвищену чутливість, що робить виконання деяких завдань неможливим або неефективним. Отримані результати підтверджують, що розроблена модель є стійкою до змін параметрів і забезпечує оптимальний розподіл завдань у більшості виробничих сценаріїв. Перспективи подальших досліджень включають розширення моделі для динамічних середовищ, інтеграцію алгоритмів машинного навчання для прогнозування та вдосконалення процесу адаптивного планування.

Ключові слова: *блочне процесне планування, алокація завдань, колаборативні роботи, Індустрія 5.0, оптимізація, функція вартості, ресурсні обмеження.*

Statement of the problem

The modern development of industry, based on the concept of Industry 5.0, focuses on harmonious interaction between people and robots, in particular collaborative ones. The main task of such systems is not only to automate production processes, but also to ensure flexible distribution of tasks between human operators and robots to achieve maximum efficiency, productivity and safety. However, this approach creates a number of problems related to synchronization of actions, optimal use of resources and real-time task planning. Existing algorithms often do not take into account the dynamics of the environment, the psychological and physical characteristics of people, as well as the limitations that arise when robots work in close contact with personnel. In particular, the problem of block process planning, which involves the distribution of tasks within certain blocks of the production cycle, is a difficult task from the point of view of developing a universal mathematical model. Insufficient attention is paid to methods that simultaneously take into account the priority of tasks, the need for adaptability to environmental changes and the need to ensure the continuity of production processes. Such approaches are critically important for achieving the main goal of Industry 5.0 – creating personalized, human-centered and sustainable production. Thus, the development of a mathematical model of block process planning, which will allow integrating the human factor and the capabilities of collaborative robots, is relevant and has significant scientific and practical interest.

Analysis of recent research and publications

Lima, RKD, Heckler, WF et al. proposed a systematic mapping and taxonomy for integrating collaborative learning and advanced technologies in the context of Industry 5.0. The main advantage of their approach is that it provides a general methodology that can be useful for building flexible learning systems for robots and humans [1]. However, from the perspective of the task of developing a mathematical model of block process planning, the proposed solutions do not take into account specific constraints on task execution time and resource optimization in real time. Their approach focuses more on interaction and learning than on efficient planning and allocation. Zafar, MH, Langås in their research have investigated the synergies between collaborative robots, digital twins and the complement of technologies for smart manufacturing. The advantage of this approach is the deep integration of digital twins, which allows for the simulation of scenarios and the testing of different planning strategies [2]. However, from the perspective of the block process planning problem, their results do not provide a detailed methodology for determining the optimal parameters of tasks

or resources. The main emphasis is on technological integration, which is not always effective for local optimization of production processes. Rahman, MM, Khatun consider the evolutionary roles of collaborative robots within the framework of Industry 5.0. The strength of their approach lies in the analysis of promising capabilities of new generation robots, such as human sensitivity and adaptation to environmental changes [3]. However, a disadvantage is the lack of specific mathematical models for planning and task allocation. Their work is useful for developing general concepts, but does not offer effective algorithms for optimizing block planning. In the article Raffik, R., Sathya [4] consider improving human-robot collaboration using collaborative robots. The advantage is the focus on human factors and building safe environments for collaboration [5]. However, their review approach does not provide mathematical models or algorithms that can be applied to task allocation systems. Thus, the use of their results is limited to scheduling optimization problems. Authors Oladeinde, A.H., & Ojo, O.O. focus on production planning and control in the context of Industry 5.0. An important advantage is their emphasis on optimizing production resource management and long-term planning [5]. However, their approaches are poorly suited for dynamic block planning tasks, since the main focus is on strategic rather than operational aspects. In the article Kumar, S.S., Kumar, S.R., & Ramesh, G. investigated the evolution from Industry 4.0 to 5.0 through the enrichment of production processes with technology and human-robot interaction. Their approach includes key principles of technical improvement and automation integration, which is useful for the overall development of concepts [6]. However, a drawback is the lack of attention to operational planning models, which does not allow using their results to solve problems in block process planning systems.

Formulation of the research objective

The aim of the research is to develop a mathematical model of block process planning for optimal task allocation between humans and collaborative robots in the dynamic production environment of Industry 5.0. The model should take into account the features of human-robot interaction, task prioritization, adaptability to environmental changes, and requirements for safety and efficiency. This will ensure the harmonious integration of the human factor and robotic technologies into production processes, increase the productivity and flexibility of systems. The research is also aimed at creating algorithmic support for implementing the model in a real production environment.

Development of a mathematical model of block process planning in task allocation systems between people and collaborative robots

In modern conditions, industry is increasingly focused on cooperation between humans and collaborative robots, which allows achieving high efficiency and adaptability of production [7]. An important aspect of this process is the development of planning models that take into account the interaction of humans and robots, ensuring the optimal distribution of tasks according to their capabilities and the current production situation. Block process planning becomes necessary for structured and flexible management of workflows, where the precise definition of the scope, priorities and sequence of tasks plays a key role. In this context, task allocation distributes tasks between humans and robots by optimizing according to their functional characteristics and process requirements.

For block process planning in task allocation systems between humans and collaborative robots, it is necessary to develop mathematical models with parameters that take into account the set of tasks, resources for their execution, and constraints [8].

Let us denote within the framework of these studies the problem model (T) as a set of problems (t_n), which can be represented by the following expression:

$$T = \{t_1, t_2, \ldots, t_n\}, \tag{1}$$

where: t_n is a task that has characteristics describing its requirements and constraints. These characteristics are necessary for optimal allocation among resources.

Then the problem t_n can be posed as a set of the following characteristics:

$$t_n = \langle d_n, c_n, p_n, r_n \rangle, \tag{2}$$

where: d_n – time required to complete the task t_n. Used to calculate the total time required to complete all tasks; c_n – a measure of the complexity of the task t_n. Complex tasks are typically assigned to human resources who can perform intellectual or creative tasks, while robots perform mechanical tasks; p_n – task priority t_n, which determines the order in which tasks are performed. This is important for tasks that require urgent execution; r_n – the resources required to complete the task t_n, which determines the use of collaborative robots and humans.

To model the assignment of the task, a variable is introduced x_{ij}, where $x_{ij} = 1$ means that the task t_n assigned to the resource j (a job or a person), otherwise $x_{ij} = 0$.

To optimize time or financial resources, it is proposed use the general cost function:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} c_n \cdot d_n \cdot x_{ij}. \tag{3}$$

Where c_i – the cost of execution, which depends on the type of task (t_n) and the resource (r_n).

The model should also take into account the total time to complete all tasks:

$$T_{total} = \sum_{i}^{n} d_n \cdot x_{ij}. \tag{4}$$

This allows you to minimize execution time while maintaining overall efficiency.

Robots (R) and people (H) are represented by sets of resources:

$$R = \{r_1, r_2, \ldots, r_m\}; \tag{5}$$

$$H = \{h_1, h_2, \ldots, h_k\}. \tag{6}$$

Each resource has accessibility settings a_i and cost of use c_i

The allocation problem is optimized using the cost function Z, which is minimized by a chosen criterion, for example, time or cost:

$$Z = \sum_{i=1}^{n} c_i x_{ij}. \tag{7}$$

Where: $x_{ij} = 1$, if the task t_i assigned to the resource r_i, otherwise $x_{ij} = 0$.

We introduce time and resource constraints to ensure efficient and rational allocation of tasks between humans and robots. Time constraints ensure that all tasks are completed within the allowable time frame, preventing delays and schedule violations. Resource constraints ensure optimal use of available resources, preventing them from being overloaded or idle. This allows for a balance between productivity and efficiency in the operation of hybrid systems that combine human and robotic potential. Time constraints can be represented as follows:

$$\sum_{i}^{n} d_i \cdot x_{ij} \le T_{\max}, \quad \forall j \tag{8}$$

$$\sum_{j=1}^{m} x_{ij} = 1, \ \forall i. \tag{9}$$

Where: $T_{\max}$ – the maximum available time for each resource to ensure even time distribution.

In order to increase efficiency It is proposed to use a benefit function that assesses the feasibility of performing a certain task by a certain resource, as can be represented as follows:

$$B(x_{ij}) = \alpha \cdot \text{efficiency} + \beta \cdot \text{flexibility} + \gamma \cdot \text{safety} \tag{10}$$

Where: α, β, γ – weighting factors.

The proposed mathematical expressions 1–10 make it possible, in the opinion of the authors, to develop an allocation system that takes into account productivity, safety, and adaptability thanks to a block approach to task management of a robotic manipulator in Industry 5.0.

Development of a program to calculate the total cost function for the proposed distribution of tasks among resources

The Python language was chosen for the development of the block process planning program due to its high accessibility, simplicity of syntax, and wide range of libraries supporting mathematical calculations and optimization [9]. Python offers tools such as NumPy, SciPy, and Pandas, which provide efficient work with data, as well as integration with specialized task distribution algorithms. The flexibility of the language allows for rapid prototype development and integration of models with machine learning or analytics systems. In addition, Python is cross-platform, which ensures its use in various production environments and automation systems.

Based on the developed mathematical models (1–10) of block process planning in task allocation systems between humans and robots, a program has been created to check the correctness of the planning. The program receives input data from the user, including parameters of tasks, resources and constraints, calculates cost and benefit functions and outputs the results.

We present a description of the software implementations of the developed mathematical models in the form of program code functions.

```
def calculate_cost ( tasks, resources, assignments) :
cost = 0
for i , task in enumerate(tasks):
for j, assigned in enumerate(assignments [ i ]):
if assigned == 1: # Task intended resource
cost += task [‘complexity’] * task [‘time’]
return cost
```

```
calculate_cost function is designed to calculate the overall cost function of allocating tasks to resources. It goes through each task and checks whether it is assigned to a specific resource, and if so, adds the product of the task's complexity and time to the total cost. This allows you to evaluate the efficiency of the scheduling in terms of resource utilization.
def validate_constraints (tasks, resources, assignments, t_max):
   for i, task in enumerate (tasks):
      total_time = sum (assignments [i][j] * task ['time'] for j in range (len (resources)))
      if total_time > t_max:
         return False , "Task timed out."
   for j, resource in enumerate (resources):
      total_resources = sum (assignments [i][j] * tasks [i]['resources'] for i in range (len (tasks)))
      if total_resources > resource ['max_resource']:
         return False , "Available resource exceeded."
   return True , «All constraints are met.»
validate_constraints function checks that the time and resource constraints for task allocation are met. It calculates the total execution time for each task and the resource utilization for each resource, comparing them to the specified limits. If any constraint is violated, the function returns an appropriate error message; otherwise, it confirms that the schedule is correct.
valid, message = validate_constraints (tasks, resources, assignments, t_max)
   print (message)
# Calculation of the cost function
   if valid:
      cost = calculate_cost (tasks, resources, assignments)
      print (f" Total cost function: {cost}")
   else :
      print («The correctness of the planning has not been confirmed.»)
```

This code checks the correctness of the task scheduling using the validate_constraints function , printing a message about the result of the check. If the constraints are met, the total cost function is calculated using calculate_cost , and the result is printed to the screen. If the constraints are violated, the scheduling is considered incorrect, and the user receives an appropriate message.

Let's conduct a series of experiments to show at what values of time and resource constraints for task allocation the following result will be obtained: all constraints are met and constraints are not met. The results of successful planning (all constraints are met) are given in Table 1, and for unsuccessful planning (constraints are not met) in Table 2.

Table 1

Results of successful planning (all constraints met)

Max Time Constraint (T_max)	Max Resources Constraint (R_max)	Valid	Cost
4	9	True	34
5	8	True	38
6	7	True	44
6	8	True	40
6	9	True	62
7	6	True	50
7	7	True	56
7	8	True	32

Table 2

Results of failed planning (constraint not met)

Max Time Constraint (T_max)	Max Resources Constraint (R_max)	Valid	Cost
4	7	False	None
5	6	False	None

For convenience of analysis Let us present the obtained experimental data from Tables 1 and 2 in the form of a combined graph, which is presented in Figure 1.

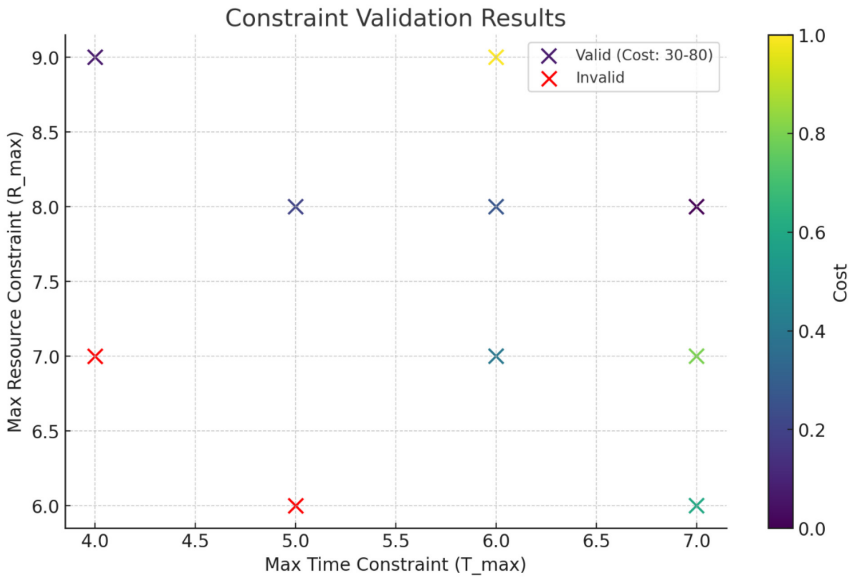


Fig. 1. Combined graph of the obtained experimental results

Figure 1 shows successful planning (total cost function in the range 30–80) and unsuccessful cases where the constraint is not met. Blue represents the cost range and red indicates non-compliance with the constraints.

The results of the experiments showed that the success of task planning depends on the correct combination of time and resource constraints. The first table shows cases when all constraints are met, and the total cost function is within 30–80. At values of $T_{max} \geq 5$ and $R_{max} \geq 7$, the system is able to ensure correct task distribution, which indicates the need for higher resource constraints for complex tasks. In contrast, the second table records violation of constraints at lower values of $T_{max} \leq 4$ and $R_{max} \leq 6$, which led to the impossibility of correct planning. Data analysis shows that the main factor is the balance between available time and resources, since their insufficiency leads to the impossibility of performing complex tasks. Thus, to achieve optimal planning, it is important to take into account the specifics of tasks and to ensure sufficient reserves of time and resources in allocation systems.

Conclusions

The results of experimental studies have shown the importance of the optimal combination of time and resource constraints for the correct distribution of tasks between humans and robots. Analysis of successful scenarios from the first table shows that for values $T_{max} \geq 5$ and $R_{max} \geq 7$ all constraints are met, and the cost function is within 30–80. This confirms the need for balanced resources to perform complex tasks. In contrast, the second table records constraint violations with insufficient time ($T_{max} \leq 4$) and resource ($R_{max} \leq 6$) parameters, which makes task performance impossible. The graphical representation of the results emphasizes the key role of time and resources: red marks on the graph illustrate scenarios where constraints are not met, while blue dots reflect successful planning.

Comparative analysis indicates that the allocation system is robust to fluctuations in the cost function within a certain range, but sensitive to a decrease in available resources. Numerical analysis based on experimental data indicates a direct relationship between available resources and the system's ability to perform tasks. Based on the results obtained, the research prospects are to expand the model to work in variable environments, integrate machine learning algorithms to predict task parameters, and increase the system's flexibility to unpredictable loads. This will not only improve allocation processes, but also increase the efficiency and reliability of production systems in the context of Industry 5.0.

References

1. Lima, RKD, Heckler, WF, Francisco, R., & Barbosa, JLV (2024). Integrating Collaborative Learning and Advanced Technology in Industry 5.0: A Systematic Mapping Study and Taxonomy. *International Journal of Human – Computer Interaction*, 1–16.

2. Zafar, M. H., Langås, E. F., & Sanfilippo, F. (2024). Exploring the synergies between collaborative robotics, digital twins, augmentation, and industry 5.0 for smart manufacturing : A state-of-the-art review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 89*, 102769.

3. Rahman, M. M., Khatun, F., Jahan, I., Devnath, R., & Bhuiyan, M. A. A. (2024). Cobotics: The Evolving Roles and Prospects of Next-Generation Collaborative Robots in Industry 5.0. *Journal of Robotics, 2024*(1), 2918089.

4. Raffik, R., Sathya, R. R., Vaishali, V., & Balavedhaa, S. (2023, June). Industry 5.0: Enhancing human-robot collaboration through collaborative robots –A review. In *2023 2nd International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA)* (pp. 1–6). IEEE.

5. Oladeinde, A. H., & Ojo, O. O. (2024, April). Industry 5.0 and Production Planning and Control in Manufacturing Industries. In *2024 International Conference on Science, Engineering and Business for Driving Sustainable Development Goals (SEB4SDG)* (pp. 1–7). IEEE.

6. Kumar, S. S., Kumar, S. R., & Ramesh, G. (2024). From Industry 4.0 to 5.0: Enriching Manufacturing Excellence through Human – Robot Interaction and Technological Empowerment. In *Intelligent Systems and Industrial Internet of Things for Sustainable Development* (pp. 24–51). Chapman and Hall /CRC.

7. Yevsieiev V. Gurin D., Comparative Analysis of the Characteristics of Mobile Robots and Collaboration Robots Within INDUSTRY 5.0., In the VI International Scientific and Theoretical Conference, September 8, 2023. Chicago, USA. pp. 92–94.

8. Yevsieiev V. Comparative analysis of the advantages and disadvantages of collaborative robot control methods within Industry 5.0., Scientific Collection "InterConf ", (172), – pp. 211–214.

9. Vladyslav Y. Comparative Analysis of the Basic Methods Used in Industry 4.0 and Industry 5.0. In Ricerche scientific and methods della loro realização: esperienza world and reality domestiche: Raccolta di articoli scientifici "ΛΌΓΟΣ" con gli atti of the IV Conference scientific and practical internazionale, Bologna. P. 114–116 https://doi.org/10.36074/logos-29.09.2023

УДК 661.12:615.453 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.21

О. В. ПАНИШЕВА
доктор фармацевтичних наук, доцент
Акціонерне товариство «Фармак»
ORCID: 0000-0001-9140-3064

В. В. ФЕДОРЕНКО
аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну,
Акціонерне товариство «Фармак»
ORCID: 0009-0003-5113-6848

В. В. ЯРЕМЕНКО
аспірант кафедри хімічних технологій та ресурсозбереження
Київський національний університет технологій та дизайну,
Акціонерне товариство «Фармак»
ORCID: 0009-0001-1757-5500

О. О. ЧОРНИЙ
кандидат технічних наук
Акціонерне товариство «Фармак»
ORCID: 0000-0002-6949-9247

С. М. ГУРЕЄВА
доктор фармацевтичних наук, професор,
професор кафедри промислової фармації
Київський національний університет технологій та дизайну,
Акціонерне товариство «Фармак»
ORCID: 0000-0002-5949-4493

РИЗИКООРІЄНТОВАНА СТРАТЕГІЯ РОЗРОБКИ СКЛАДУ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ТВЕРДИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ

Вперше комплексно розглянуто проблему підвищення розчинності АФІ у твердих фармацевтичних системах шляхом створення полімерного композиційного матеріалу з урахуванням його цільового профілю якості препарату. Запропоновано алгоритм проведення досліджень на етапі преформуляції. На прикладах мефенамінової кислоти та ривароксабану показано експериментальні дані. Ідентифіковано фактори ризиків щодо продукту на основі твердої дисперсної системи, а також оцінено ризики для забезпечення якості процесу виробництва препарату в умовах фармацевтичного підприємства. Зазначено потенційні критичні показники якості препарату та оцінено їхню критичність. Визначено та описано критичні показники якості вихідних компонентів та властивостей продукту. Ідентифіковано, проаналізовано та оцінено найбільш імовірні ризики для якості препарату на етапі фармацевтичної розробки. Виявлено та обґрунтовано фактори ризику, які характерні для досліджуваного процесу та впливають на якість процесу виробництва лікарського препарату. Визначено, що для досліджуваних продуктів, розпадання, розчинення, супровідні домішки, кількісне визначення та однорідність дозованих одиниць визначені як критичні характеристики якості, що потенційно можуть вплинути на якість препарату. Описано, що факторами ризику для досліджуваного препарату є тверда дисперсна система, виробнича рецептура, технологічний процес, система упаковки та методи контролю якості. Показано, що стадії Приготування таблетмаси і Фасування, пакування та маркування виробничого процесу мають суттєвий ступінь ризику, що є прийнятним. Доведено, що використання оцінки ризиків дозволяє обґрунтовано підходити до процесу розробки та виробництва при мінімізації кількості матеріальних та часових ресурсів.

Ключові слова: *тверді дисперсні системи, фармацевтична розробка, цільовий профіль якості препарату, критичні показники якості, оцінка ризиків.*

O. V. PANYSHEVA
Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor
Joint Stock Company Farmak
ORCID: 0000-0001-9140-3064

V. V. FEDORENKO
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Resource Saving
Kyiv National University of Technology and Design,
Joint Stock Company Farmak
ORCID: 0009-0003-5113-6848

V. V. YAREMENKO
Postgraduate Student at the Department of Chemical Technologies
and Resource Saving
Kyiv National University of Technology and Design,
Joint Stock Company Farmak
ORCID: 0009-0001-1757-5500

O. O. CHORNYI
Candidate of Technical Sciences
Joint Stock Company Farmak
ORCID: 0000-0002-6949-9247

S. M. GUREYEVA
Doctor of Pharmaceutical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Industrial Pharmacy
Kyiv National University of Technology and Design,
Joint Stock Company Farmak
ORCID: 0000-0002-5949-4493

RISK-ORIENTED STRATEGY FOR THE DEVELOPMENT OF THE COMPOSITION AND TECHNOLOGY OF SOLID DISPERSION SYSTEMS

For the first time, the problem of increasing the solubility of APIs in solid pharmaceutical systems by creating a polymeric composite material with regard to its target drug quality profile is comprehensively considered. An algorithm for conducting research at the preformulation stage is proposed. Experimental data are shown on the examples of mefenamic acid and rivaroxaban. The risk factors for a product based on a solid dispersion system are identified, and the risks to the quality of the drug manufacturing process in a pharmaceutical enterprise are assessed. The potential critical quality indicators of the drug are indicated and their criticality is assessed. The critical quality indicators of the initial components and product properties are identified and described. The most probable risks to the quality of the drug at the stage of pharmaceutical development are identified, analysed and assessed. The risk factors that are specific to the process under study and affect the quality of the drug manufacturing process are identified and substantiated. It has been determined that for the products under study, disintegration, dissolution, accompanying impurities, quantification and homogeneity of dosage units are identified as critical quality characteristics that can potentially affect the quality of the drug. It is described that the risk factors for the investigated drug are the solid dispersion system, manufacturing formulation, technological process, packaging system and quality control methods. It is shown that the stages of preparation of tablet mass and packaging, packing and labelling of the production process have a significant degree of risk, which is acceptable. It is proved that the use of risk assessment allows a reasonable approach to the development and production process while minimising the amount of material and time resources.

Key words: *solid dispersion systems, pharmaceutical development, quality target product profile, critical quality indicators, risk assessment.*

Постановка проблеми

Створення ефективних та безпечних лікарських засобів (ЛЗ) є складним завданням, що потребує комплексного підходу та глибокого розуміння багатьох факторів. Від вибору активного фармацевтичного інгредієнта (АФІ) до розробки оптимальної рецептури та технології виробництва, кожен етап має свої особливості та потенційні ризики, особливо коли мова йде про розробку твердих дисперсних систем (ТДС) [1]. Так, ТДС – це дво- або полікомпонентні системи, що складаються з АФІ та носія. Вони являють собою високодиспергована тверду фазу АФІ, або тверді розчини, що формують комплекси з матеріалом носія. Для їх створення критично важливим є вибір носія, оскільки він впливає на розчинність, стабільність та вивільнення АФІ, а також вибір методу отримання ТДС, наприклад одного з таких, як розпилювальне сушіння, екструзія гарячого розплаву, випаровування розчинника, високоенергетичне змішування та багатьох інших. Відповідно, така кількість різноманітних факторів спричинює багато складнощів з їх управлінням, розумінням природи труднощів та узагальненням наявних даних [2].

Для розробників додаткові виклики, також створюють особливості речовин II класу за Біофармацевтичною системою класифікації (БСК), що характеризуються низькою розчинністю у воді, та високою проникністю [3]. Для препаратів II класу БСК процес розчинення має вирішальне значення для забезпечення високої, або прийнятної абсорбції ліків [4]. Наприклад, розчинність мефенамінової кислоти у воді становить 0,2 мг/мл, але різко зростає при додаванні напівполярних розчинників. Серед використовуваних розчинників було виявлено, що етанол і ПЕГ-400 значно підвищують розчинність (>11 мг/мл). Розчинність мефенамінової кислоти була різко знижена після додавання води до ПЕГ-400 і етанолу, що може бути пов'язано зі збільшенням полярності системи. Встановлено, що оптимальна концентрація ПЕГ-400 становить 80 %, а розчинність більше 5,7 мг/мл. Поверхневоактивні речовини незначно покращили розчинність. Тверді дисперсії препарату з сечовиною, манітом і полівінілпіролідоном (1:1, 1:2) як носії показали незначне покращення розчинності у воді; показали, що носії не дають високоенергетичних форм препарату. Було виявлено, що розчинність препарату збільшується зі збільшенням концентрації буфера (pH від 1,2 до 11,0) за рахунок іонізації (pKa = 4,32) при більш високому pH. Симплексний метод також використовувався для оптимізації та отримання оптимальної суміші розчинників (потрійна система). Для виготовлення розчинних лікарських форм оптимальними виявилися потрійні суміші, що містять системи пропіленгліколь-ПЕГ-400-етанол (30:30:40, 30:40:30, 40:40:20) та етанол-ПЕГ-400-вода (40:50:10). Вища розчинність препарату в системі пропіленгліколь-ПЕГ-400-етанол вказує на те, що гідрофобні взаємодії є більш переважними, ніж водневі зв'язки [5–7].

Саме тому, невід'ємною частиною фармацевтичної розробки є всебічне вивчення та оцінка потенційних ризиків на кожному етапі досліджень. Для цього актуальним є застосування сучасної методології якості за проектом (QbD) [8]. Дана методологія є систематичним підходом до якісної та надійної розробки продукту, оскільки є своєрідною системою якості для управління життєвим циклом продукту та нормативними вимогами, призначена для покращення розуміння процесу, продукту і зниження ризиків. Вона починається з попередньо визначеної цілі та наголошує на розумінні продукту та процесу, дизайну експерименту, дизайну простору та управління його результатами в більш безпечному діапазоні [9].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

В останні роки спостерігається підвищений інтерес серед дослідників до використання в цілому підходу QbD та оцінки ризиків як його частини при розробці твердих дисперсних систем. Так, Daniela M. et al застосовують зазначену методологію в фармацевтичній розробці наносистем на основі ліпідів. Автори підкреслюють, що застосування більш цілісного та системного підходу, основаного на застосуванні фармацевтичних керівних документів ICH Q8, Q9, Q10, Q11, Q12, є обов'язковим для подолання технологічних викликів та проблем з якістю, що забезпечується завдяки глибшому розумінню продукту і процесу, та в свою чергу призводить до отримання більш якісних ліків на основі ліпідів [10].

Tejashree W. et al розглядають реалізацію принципів QbD у процесах формуляції та оптимізації рідкокристалічних наночастинок, що призводить до кращого розуміння продукту та процесу, більшої гнучкості в межах спланованого простору, впровадження ефективніших стратегій контролю, прогнозованішого трансферу технології та загалом отримання якіснішого продукту [11].

Farid M. et al описують використання концепції QbD при розробці систем доставки ліків на основі гідрогелю. Такий підхід, направлений на виявлення найбільш ефективних факторів у виробництві фармацевтичної продукції та їх контролю, призводить до отримання продукту бажаної якості з найменшою кількістю помилок. Для цього на етапах розробки та виробництва даних систем, необхідно визначити, які цільові характеристики та фактори слід враховувати, наприклад, властивості матеріалу чи параметри процесу, для досягнення критичних показників якості (CQA) продукту [12].

Jaiprakash N. et al пояснюють, що отримання бажаної якості продукту через дизайн набуло значного впливу у фармацевтичній галузі, оскільки може охоплювати всі етапи життєвого циклу лікарських засобів. Ключовим фактором, що зумовлює впровадження QbD, є регуляторні вимоги, які фармацевтична промисловість зобов'язана дотримуватися. І саме цей концепт, дозволяє забезпечити високу якість продукту, враховуючи економічні потреби, завдяки ґрунтовному розумінні процесів заснованому на науковому підході та оцінці ризиків [13].

Swapnil S. et al наводять практичне дослідження по застосуванню QbD при проектуванні та розробці комбінованих препаратів на прикладі флунізоліду. Було визначено профіль якості цільового продукту та визначено CQA (в'язкість та D50 розподіл крапель за розміром). Потенційні фактори ризику були визначені за допомогою діаграми Ішикави та аналізування видів, наслідків та критичності відмов (FMEA). Для скринінгу та оптимізації діапазону змінних використовували плани Плакетта-Бермана та Бокса-Бенкена відповідно [14].

Buket A. et al обговорюють використання систем зі штучним інтелектом для контролю CQA таблеток раміприлу. Так, за допомогою генерації нейронечітких правил, програмне забезпечення FormRules було навчено описувати та відображати взаємозв'язки між усіма параметрами рецептури та процесу. На основі отриманих даних було розроблено наступне програмне забезпечення – INForm, яке включає програми штучних нейронних мереж та генетичних алгоритмів. Це програмне забезпечення встановило кількісні зв'язки між тими ж наборами вхідних

параметрів процесу та рецептур і забезпечило досягнення проектного простору шляхом оптимізації цих параметрів [15].

Simao J. et al впровадили QbD для розробки двошарових таблеток. Було виявлено, що використання NIR та Раманівської спектроскопії як аналітичних складових процесу QbD та Process Analytical Technology (PAT) є ефективним для масштабування двошарових таблеток, що містять низьку дозу АФІ. Було збільшено розуміння тенденцій розшарування за рахунок доведення через досліди, що міцність міжфазного зв'язку залежить від площі зв'язку та міцності зв'язку. Також було оптимізовано концентрації супердезінтегрантів і полімерів в таблетках гідрохлоротіазиду, при цьому істотно зменшивши джерела мінливості та уникнувши значної частини ресурсів і часу, необхідних для традиційного підходу [16].

Тому, використання концепції QbD є важливою та ефективною частиною етапів розробки, масштабування чи виробництва будь-якого фармацевтичного продукту.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи було провести оцінку ризиків для розробки рецептур і технології ТДС та ЛЗ на їх основі в склад яких входять малорозчинні АФІ ІІ класу БСК та розробити коригувальні й запобіжні заходи для всіх критичних точок.

Викладення основного матеріалу дослідження

Об'єктами дослідження були ТДС на основі речовин ІІ класу БСК (мефенамінова кислота і ривароксабан).

Мефенамінова кислота або 2-[(2,3-диметилфеніл)аміно]бензойна кислота є похідною антранілової кислоти. Це представник групи фенаматів у категорії нестероїдних протизапальних препаратів (НПЗП). Аналогічно іншим НПЗП, дія мефенамінові кислоти реалізується за рахунок інгібування протизапального фермента циклооксигенази (усіх її фракцій). Характеризується наявністю знеболювального, жарознижувального та протизапального ефектів, застосовується для лікування легкого та помірного болю [17]. Мефенамінова кислота являє собою мікрокристалічний порошок від білого до сірувато-білого кольору без запаху з температурою плавлення 230–231 °С. Практично не розчиняється у воді [18], від 0,004 мг/мл при 37 °С [19] до 0,2 мг/мл при 25 °С [5]. Належить до лікарських засобів класу ІІ за БСК [20]. В ході роботи використовували мефенамінову кислоту фірми Shaanxi Baoxin Pharmaceutical co. ltd, Китай.

Ривароксабан за своїм хімічним складом є похідним оксазолідинонів. Відноситься до групи антитромботичних засобів. Це високоселективний прямий інгібітор фактора Ха, що має достатньо високу біодоступність при пероральному застосуванні. Блокування активності фактору Ха перериває внутрішній та зовнішній шляхи коагуляційного каскаду, і, як наслідок, пригнічується формування тромбіну та утворення тромбу. Ривароксабан безпосередньо не пригнічує активність тромбіну (активованого фактора ІІ) та не впливає на тромбоцити [21]. Це кристалічний порошок білого або майже білого кольору, кристали ривароксабану поліморфа І мають неправильну форму і розмір від 20 до 200 мкм, а також мають невелику тенденцію до утворення агломератів, що мають розмір до 400 мкм, температура плавлення 228–229 °С [22, 23]. Ривароксабан помірно розчинний у 80 % оцтовій кислоті, мало розчинний у ацетоні та дихлорметані, дуже слабо розчинний у метанолі та етанолі і практично не розчинний у толуолі, н-гексані, воді і водному середовищі з pH 1–9 [24]. Відповідно до рекомендацій ІСН ривароксабан класифікується як малорозчинна речовина, яка відноситься до ІІ класу БСК [25, 26]. При розробці використовували субстанцію виробництва Teva Pharmaceutical Industries Ltd (Assia Chemical Industries Ltd, Teva Tech site), Ізраїль.

Алгоритм проведення досліджень на етапі преформуляції включає наступні етапи (рис. 1):

1. Цільовий профіль якості препарату (QTPP).
2. Ступінь впливу кожного критичного показника якості (CQAs) на безпеку й ефективність.
3. Визначення критичних показників якості матеріалів (CMAs).
4. Визначення критичних показників якості лікарського препарату (ЛП).
5. Первинне оцінювання ризиків показників якості АФІ на критичні показники якості готового лікарського засобу (ГЛЗ).
6. Виявлення критичних етапів технологічного процесу.
7. Ідентифікація можливих ризиків, пов'язаних із критичними показниками якості препарату (метод побудови діаграми причинно-наслідкового зв'язку – діаграми Ішикави).
8. Кількісний FMEA-аналіз ризиків процесу розроблення і стратегія контролю.
9. Розробка коригувальних і запобіжних заходів для всіх критичних точок.

У дослідженні використано методи аналізу, групування, порівняння та узагальнення.

З метою розробки рецептур і технології ТДС використано методи QbD, зокрема цільовий профіль якості препарату (QTPP) [27, 28]. Для проведення ідентифікації ризиків використано метод HAZOP (Hazard and operability studies) – метод аналізу небезпек та працездатності [29, 30]. При диференціюванні можливих ризиків прийнято:

– сигнальне слово ні, якщо ризик вважається не суттєвим, приймається та не потребує заходів зі зниження ризиків, коли відсутній вплив на якість показника згідно методів контролю якості (МКЯ);

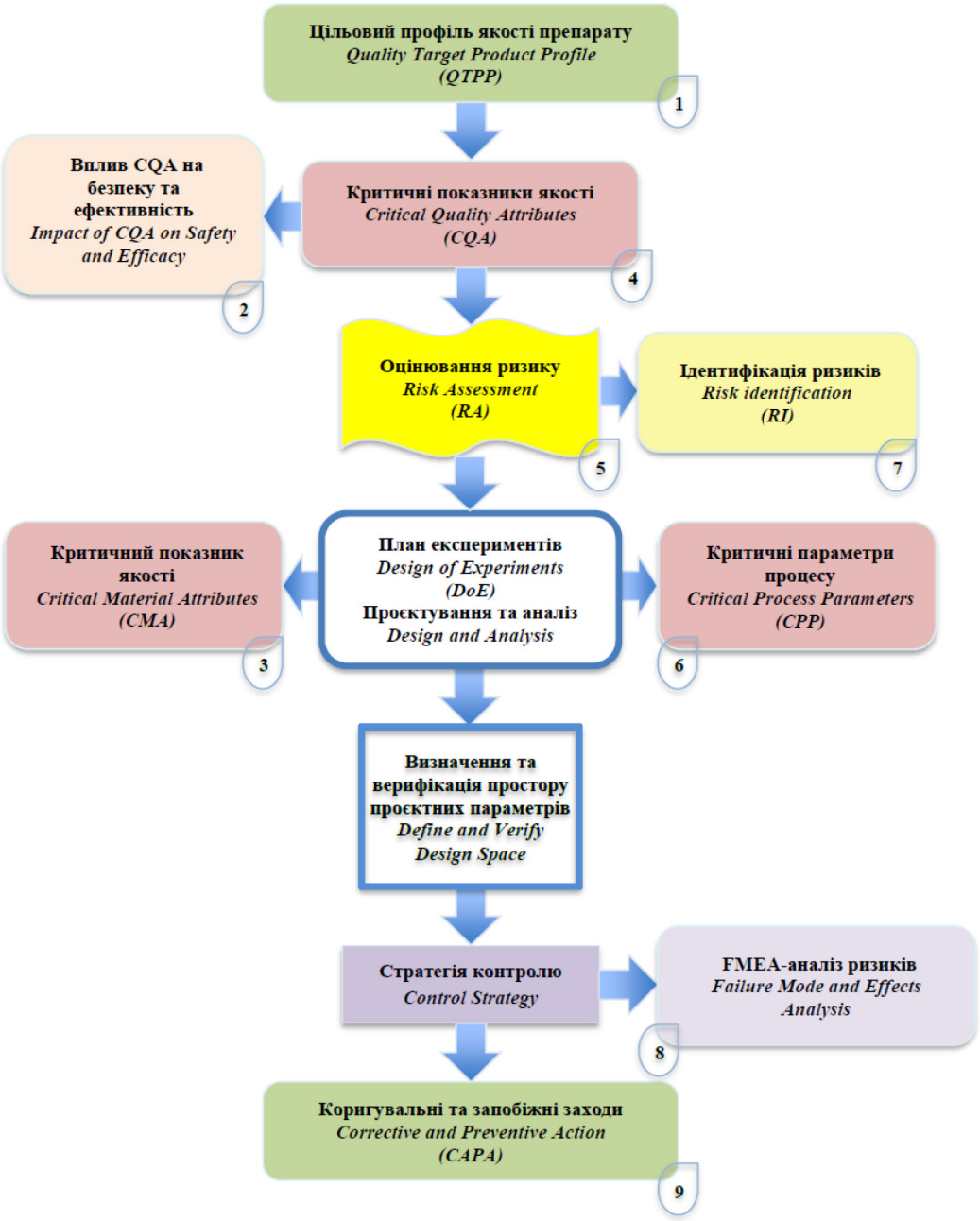


Рис. 1. Схема проведення досліджень для розробки рецептур і технології твердих дисперсних систем на етапі преформуляції

– сигнальне слово так, якщо ризик вважається критичним, не приймається, та потребує переоцінки потенційного впливу після імплементування визначених заходів зі зниження ризиків (або відмови від ризику), коли наявний прямий та явний вплив на якість показника згідно МКЯ.

Для аналізу ідентифікованих ризиків даного відхилення використовується метод Аналіз видів, наслідків та критичності відмов (Failure mode and effects analysis, FMEA) [30]. Визначення допустимої величини ризику проводилось шляхом моделювання «найгіршого випадку», який можна контролювати. За основу при визначенні допустимої величини ризику прийнято означення, що критичними вважаються всі ризики, які перевищують середній рівень тяжкості наслідків, середній рівень ймовірності появи. Оцінку режимів, причин і наслідків кожної потенційної відмови та їх серйозності (S), появи (O) і виявленості (D) проводять за шкалою від 1 до 10. Пріоритет ризику (RPN, risk priority number) розраховувався за формулою:

$$RPN = P \times S \times D, \quad (1)$$

де P – ймовірність появи (probability); S – тяжкість наслідків (severity); D – здатність до виявлення (determinability).

Для розрахунку величини ризику, використовується трибальна кількісна шкала (таблиця 1).

Таблиця 1

Кількісна шкала для розрахунку величини ризику

		Тяжкість наслідків, S		
		Низька (1 бал)	**Середня (2 бали)**	**Висока (3 бали)**
Ймовірність появи, P	Низька (1 бал)	Низький ризик (1 бал)	Низький ризик (2 бали)	Суттєвий ризик (4 бали)
	Середня (2 бали)	Низький ризик (2 бали)	Суттєвий ризик (4 бали)	Високий ризик (6 балів)
	Висока (3 бали)	Суттєвий ризик (3 бали)	Високий ризик (6 балів)	Високий ризик (9 балів)

Критерії бальної оцінки тяжкості наслідків та ймовірності появи наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Критерії бальної оцінки тяжкості наслідків та ймовірності

Тяжкість, *S*	**Означення**	**Ймовірність, *P***	**Означення**
1 бал	Відхилення не несе прямого або опосередкованого впливу на фізико-хімічні/мікробіологічні показники якості	1 бал	Відсутня ймовірність виникнення загрози
2 бали	Відхилення несе опосередкований вплив на фізико-хімічні/ мікробіологічні показники якості	2 бали	Може бути загрозою для однієї серії ЛЗ
3 бали	Відхилення несе прямий вплив на фізико-хімічні/мікробіологічні показники якості	3 бали	Може бути загрозою для декількох серій ЛЗ або кампанії

Значення RPN наведено у таблиці 3.

Таблиця 3

Значення RPN

		Значення тяжкості та ймовірності появи, (P×S)					
		Низький ризик		**Суттєвий ризик**		**Високий ризик**	
Здатність до виявлення, D	Висока (1 бал)	1	2	3	4	6	9
	Середня (2 бали)	2	4	6	8	12	18
	Низька (3 бали)	3	6	9	12	18	27

Шкала оцінки ризику наведена у таблиці 4.

Таблиця 4

Шкала оцінки ризику

Розрахована величина ризику	**Ступінь ризику**	**Необхідність заходів зниження ризику**	
18–27	Критичний	Ризик не прийнятний	Додаткові заходи необхідні, напрацювання препарату неможливе до виконання запобіжних заходів
6–12	Суттєвий	Ризик прийнятний	Додаткові заходи необхідні, напрацювання препарату можливе незалежно від виконання запобіжних заходів
1–4	Не суттєвий	Ризик прийнятний	Додаткові заходи не потрібні, напрацювання препарату можливе

Результати досліджень та їх обговорення

Цільовий профіль якості препарату (QTPP)

В ході розробки складу і технології препаратів на етапі преформуляції вивчали фізико-хімічні характеристики АФІ, особливості їх клінічного використання, проводили маркетингові дослідження ЛЗ на їх основі. Згідно літературного і патентного пошуку шляхів підвищення розчинності малорозчинних АФІ відмічено, що проблема низької розчинності ривароксабану вирішується при зменшенні розміру частинок шляхом мікронізації (збільшення площі поверхні частинок і, таким чином, полегшення розчинення). Сучасним напрямком підвищення розчинності є створення ТДС. При інформаційному пошуку особливу увагу приділяли фармацевтично прийнятним полімерам, технологіям виготовлення ТДС та основним методам дослідження полімерного композиційного матеріалу.

В результаті проведених робіт для підвищення розчинності АФІ запропоновано створити ТДС шляхом використання полімерного матеріалу. Так як на ринку мефенамінова кислота представлена у формах таблеток і капсул,

а ривароксабан – таблеток, вкритих плівковою оболонкою, прийнято рішення розробити препарати у формі таблеток.

Щоб забезпечити бажану якість лікарського засобу з урахуванням безпеки та ефективності (ICH Q8 (R1)) було визначено якісні характеристики препаратів. Розроблено цільовий профіль якості продуктів (табл. 5), який служить основою для розробки. Успішне впровадження цих параметрів допомагає відповідати вимогам якості кінцевого продукту.

Таблиця 5

Цільовий профіль якості препарату (QTPP)

Елемент цільового профілю якості	**Критерій**	
	Мефенамінова кислота, таблетки, 500 мг	**Ривароксабан, таблетки, 10 мг**
Клінічне використання	Нестероїдні протизапальні засоби. Фенамати	Антитромботичні засоби. Прямі інгібітори фактору Ха
Шлях введення	Пероральний	
Лікарська форма	Таблетки	
Система доставки	Тверда дисперсна система	
Дозування	500 мг	10 мг
Ознаки якості лікарського засобу	Опис	
	Ідентифікація	
	Середня маса	
	Розчинення	
	Супровідні домішки	
	Однорідність дозованих одиниць (ОДО)	
	Кількісне визначення	
	Мікробіологічна чистота	
Пакування	Блістери № 10	
Система упаковки	По 2 блістери з інструкцією для медичного застосування в картонній коробці	
Стабільність	2 роки	

Ступінь впливу кожної критичної характеристики якості (CQAs) на безпеку й ефективність

Після встановлення цільового профілю якості препарату наступним кроком у розробці лікарських засобів є ідентифікація критичних характеристик якості (CQA) кінцевого лікарського продукту. ICH Q8 (R1) визначає CQA як фізичні, хімічні, біологічні або мікробіологічні властивості або характеристики, які повинні бути в рамках відповідних меж, діапазону, специфікації або розподілу для досягнення бажаної якості продукції. Вони надають краще розуміння продукту та процесу. Постійний моніторинг цих CQA від ранньої стадії розробки складу і технології продукту та стадії тестування стабільності до великомасштабного виробництва має важливе значення для того, щоб лікарський продукт зберігав ці CQA, необхідні для ефективності та безпеки пацієнтів.

На CQA лікарського засобу істотно впливають характеристики виробничої рецептури і параметри технологічного процесу. Виробнича рецептура залежить від якісного і кількісного складу (АФІ, полімеру і допоміжних речовин). На зберігання показників якості готового продукту в межах вимог в процесі стабільності також впливає система упаковки, зокрема вид пакувальних матеріалів. Для визначення CQA не обійтися без розробки та валідації МКЯ.

При створенні препаратів важливим проміжним продуктом, який доцільно охарактеризувати, є ТДС. Використовуючи попередній досвід з розробки продуктів, процесу та літературних даних, попередньо визначено найважливіші CQA: ідентифікація, кристалічність, морфологія поверхні, розчинення, супровідні домішки, кількісне визначення та вологовміст. Розмір частинок, насипна густина, текучість, стисливість і компактність є ключовими параметрами під час подальшої обробки. Однак ці параметри можна контролювати шляхом додавання відповідних допоміжних речовин з групи наповнювачів, дезінтегрантів, глідантів та лубрикантів. Отже, ці параметри надалі не розглядалися як потенційні CQA для ГЛЗ.

Ідентифікація дозволяє підтвердити структуру АФІ в незміненому вигляді після отримання ТДС. Вона проводиться методом ІЧ-спектроскопії (для ТДС мефенамінової кислоти), або рідинної хроматографії (для ТДС ривароксабану).

Кристалічність визначає кількість АФІ кристалічної фази в твердій дисперсії порівняно з аморфною фазою після проведеного процесу. Для підтвердження отримання ТДС та її аморфізацію проводяться дослідження методами диференційної скануючої калориметрії (DSC) та рентгенівської дифракції (XRD). DSC відображає температурну поведінку суміші, а XRD – атомну структуру, включаючи просторове розміщення, її розміри і кристалічні та аморфні характеристики.

Морфологія поверхні визначається за допомогою мікроскопічних досліджень.

Розчинення. Профіль розчинення ТДС у багатьох випадках впливає на біодоступність при пероральному прийомі in vivo через потенціал преципітації вивільненого препарату в шлунково-кишковій рідині. Це пояснюється високою кінетичною розчинністю АФІ в полімерній матриці, яка перевищує рівень перенасичення АФІ.

Супровідні домішки визначають методом рідинної хроматографії, підтверджують чистоту суміші та відсутність деградація АФІ. Профіль деградації може вплинути на безпеку та ефективність пацієнта. У більшості випадків деградація АФІ в ТДС може не відбутися, поки АФІ повністю не розчиняється, або не змішується з полімерною матрицею, не залишаючи залишкової кристалічності.

Кількісне визначення є важливою характеристикою якості, оскільки може впливати на безпеку та ефективність розроблених ЛЗ.

Вологовміст може впливати на фізичну та хімічну стабільність препарату.

Визначення критичних показників якості матеріалів (CMAs)

На етапі преформуляції визначали властивості активної та неактивної вхідної сировини, які мають прямий вплив на CQA та є важливим елементом у регулюванні якості продукції. Ідентифікація та скринінг цих CMA є основою для їх критичної природи в CQA лікарського засобу. Ця критичність досягається за допомогою інструментів оцінки ризиків. Вибір правильного матеріалу в оптимальній кількості забезпечує успішний технологічний процес з широким простором проектування процесу та оптимальною якістю продукту. Знання CMA та їх взаємозв'язку з CQA лікарських засобів і впливу на них є основоположним для успішного впровадження QbD у розробку продукту.

У розробці ТДС є важливими знання та розуміння теплових і реологічних властивостей АФІ та полімерних матеріалів. CMA включають розмір частинок і текучість АФІ та полімеру; тип полімеру (негайне вивільнення проти тривалого вивільнення та pH-залежний, або pH-незалежний); природа полімеру (аморфна, кристалічна, або напівкристалічна); температура плавлення АФІ і полімеру; розчинність та вміст вологи в полімері та АФІ. Дослідження та характеристика цих параметрів надають інформацію для ідентифікації CQA лікарського засобу.

Визначення критичних показників якості ЛП

На наступному етапі роботи визначали CQA ГЛЗ. Результати досліджень наведено у таблиці 6, де вказано CQA препарату із зазначенням критичності показників.

Для досліджуваних продуктів розпадання, розчинення, супровідні домішки, ОДО та кількісне визначення визначені як CQA, які потенційно можуть вплинути на якість препарату. З іншого боку, CQA, включаючи опис, ідентифікацію, середню масу та мікробіологічну чистоту, навряд чи вплинуть на змінні складу та/або процесу. Однак ці критичні показники якості все ще є цільовими елементами цільового профілю і забезпечуються системою фармацевтичної якості та стратегією контролю.

Первинне оцінювання ризиків показників якості АФІ на критичні характеристики якості ГЛЗ

Після визначення критичних характеристик якості було проведено первинну оцінку ризиків показників якості АФІ на CQA продукту. Ґрунтуючись на попередніх знаннях, досвіді роботи та інформації про АФІ, оцінено ризики мінливості рецептури та визначено їхній вплив на кожен CQA. Результати роботи наведено в табл. 7.

На основі оцінки ризику були проведені дослідження з метою зниження високих і середніх ризиків мінливості рецептури до низького рівня. Проведений аналіз дозволяє відмітити, що розмір частинок АФІ впливає на розчинення і ОДО, тому при експериментальних дослідженнях під час розробки формуляції вивчали АФІ з різним розміром частинок. CQA залежать від природи та кількості полімеру. Природа та кількість дезінтегранту, поверхнево-активну речовину і лубрикант обираємо за результатами тесту розчинення. Додатково вивчена сумісність АФІ з допоміжними речовинами методом рідинної хроматографії.

Виявлення критичних етапів технологічного процесу

Якість ЛЗ також пов'язана з технологією, яка використовується у виробництві ТДС. Так, для отримання твердої дисперсної системи можна використовувати різноманітні методи, серед яких розпилювальне сушіння, екструзія гарячого розплаву, випаровування розчинника та інші. Вибір способу отримання вимагає попередніх знань процесу, літературних даних і експериментальних досліджень. Тому на наступному етапі роботи було проведено первинну оцінку ризиків варіабельності технологічного процесу для CQA готового лікарського засобу. З цією метою CQA ідентифікували за допомогою загальноприйнятого підходу до оцінки ризиків, які контролюються протягом усього процесу розробки продукту, щоб забезпечити продуктивність процесу та якість продукту. Результати оцінювання наведено в таблиці 8.

Ідентифікація можливих ризиків, пов'язаних із критичними показниками якості препарату (метод побудови діаграми причиново-наслідкового зв'язку – діаграми Ішикави)

Після визначення CQA, CMA та CQA проводили зв'язування CMA та CQA із CQA за допомогою методології оцінки ризиків, зокрема діаграми Ішикави. Вона відома як діаграма «риб'ячої кістки» або причинно-наслідкового зв'язку. Графічне зображення всіх можливих змінних і потенційного ризику CMA та CQA на CQA лікарського засобу наведено на рисунку 2.

Таблиця 6

Критичні показники якості препарату

Показник якості	Критерій		CQA	Обґрунтування
	Мефенамінова кислота, таблетки, 500 мг	**Ривароксабан, таблетки, 10 мг**		
Опис	Таблетки від білого до майже білого кольору, овальні з рискою на одній стороні, двоопуклі	Таблетки від білого до майже білого кольору, круглі без риски, двоопуклі	ні	Колір, форма, опис не мають прямого впливу на ефективність та безпечність
Ідентифікація	Відповідає еталону мефенамінової кислоти	На хроматограмі досліджуваного розчину, отриманому в розділі «Кількісне визначення», час утримання піку ривароксабану повинен відповідати часу утримування піку ривароксабану на хроматограмі розчину порівняння з точністю до ±2 %. УФ спектр поглинання випробовуваного розчину в діапазоні від 220 нм до 320 нм повинен мати максимум при довжині хвилі (250 ± 2) нм	ні	Хоча ідентифікація має вирішальне значення для безпеки та ефективності, цей CQA можна ефективно контролювати за допомогою системи управління якістю, що й буде контролюватися при випуску лікарського препарату. Формуляція та варіабельність процесу не впливають на ідентифікацію
Середня маса	Від 712,5 мг до 787,5 мг (750,0 мг ± 5 %)	Від 95,0 мг до 105,0 мг (100 мг ± 5 %)	ні	Варіабельність показника не впливає на ефективність і безпеку
Розчинення	Не менше 75 % (Q) через 15 хв	Не менше 80 % (Q) через 30 хв	так	Впливає на ефективність, оскільки опосередковано відображає вивільнення АФІ за певний період часу. Згідно EPAR можна контролювати «Розпадання» як заміна тесту «Розчинення»
Супровідні домішки: – Будь-якої неспецифікованої домішки Сума домішок	≤ 0,2 % ≤ 1,0 %		так	Межа продукту розкладання має вирішальне значення для безпеки лікарського препарату. Нормування продукту деградації АФІ відповідає ICH Q3B
ОДО	Відповідно до вимог ДФУ та ЄФ AV ≤ 15		так	Варіабельність впливає на ефективність, оскільки опосередковано відображає кількісний вміст АФІ
Кількісне визначення	Від 475 мг до 525 мг в розрахунку на 1 таблетку (95,0–105,0 %)	Від 9,5 мг до 10,5 мг в розрахунку на 1 таблетку (95,0–105,0 %)	так	Варіабельність кількісного визначення впливає на безпеку або ефективність для пацієнта
Мікробіологічна чистота: – ТАМС – ТУМС – Escherichia coli	≤ 10^3 КОЕ/г ≤ 10^2 КОЕ/г Відсутні в 1 г		ні	Статистично підтверджено низький ризик перевищення мікробних меж, що може впливати на безпеку пацієнта

Таблиця 7

Первинна оцінка ризиків формуляції

CQA	Розмір частинок АФІ	Природа та кількість полімеру	Природа та кількість дезінтегранту	Природа та кількість ПАР	Природа та кількість змащувальної речовини
Розчинення	Високий	Високий	Середній	Середній	Середній
Супровідні домішки	Низький	Середній	Низький	Низький	Низький
ОДО	Середній	Середній	Низький	Низький	Низький
Кількісне визначення	Низький	Середній	Низький	Низький	Низький

Як бачимо з рисунку, факторами ризику для досліджуваного препарату є ТДС, виробнича рецептура, технологічний процес, система упаковки та МКЯ.

Кількісний FMEA-аналіз ризиків процесу розробки і стратегія контролю

За допомогою FMEA-аналізу проведено ідентифікацію, аналіз та оцінку потенційного ризику, пов'язаного з кожним CMA та CQA, а також їх впливом на CQA продукту. Цей метод дозволяє оцінити вплив ризику безпосередньо на якість продукції і визначити етапи виробничого процесу, на яких потрібно найретельніше здійснювати контроль якості. У табл. 9 наведено результати загального оцінювання ризику отримання препарату методом FMEA, визначено їхні характеристики та стратегію контролю.

Таблиця 8

Первинна оцінка ризиків технології

CQA	Підготовка сировини	Метод отримання	Приготування таблетмаси	Таблетування	Фасування, пакування та маркування
Розчинення	Високий	Високий	Середній	Середній	Низький
Супровідні домішки	Низький	Середній	Низький	Низький	Середній
ОДО	Низький	Низький	Високий	Низький	Низький
Кількісне визначення	Низький	Низький	Середній	Низький	Низький

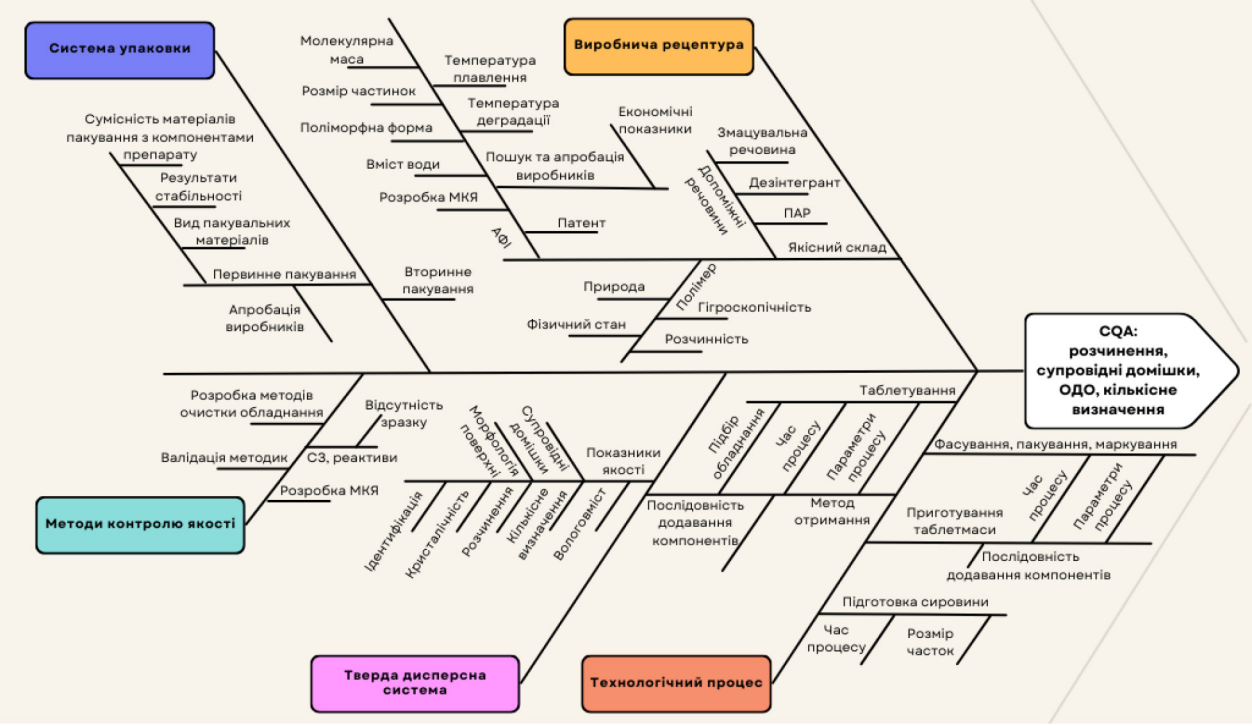


Рис. 2. Діаграма Ішикави

Таблиця 9

Кількісний FMEA-аналіз ризиків процесу розробки ТДС і стратегія контролю

Критична точка	Можливі ризики	Обґрунтування	Запобіжні та коригувальні заходи (метод контролю)	Ризик			RPN
				S	O	D	
Підготовка сировини	Невідповідність ГЛЗ вимогам НТД	Якість сировини має відповідати затвердженій документації	Вхідний контроль, контроль умов зберігання	4	4	3	48
	Розмір частинок сировини	Раціональний контроль за розміром отворів сита	Калібрування розмірів отворів сит для просіювання	4	3	3	36
Метод отримання	Втрати АФІ при отримання ТДС	Не вірні параметри процесу	Підбір оптимальних параметрів	4	4	3	48
	Проблеми зі стабільністю	Проблема зі складом допоміжних речовин або параметрів процесу	Зміна складу ТДС та параметрів процесу	4	3	3	36
Приготування таблетмаси	Тривалість та інтенсивність перемішування	Проблеми з сипучістю та однорідністю маси	Фізичний (сипучість, втрата в масі при висушуванні), ВЕРХ (КВ, розчинення)	2	2	3	12
Таблетування	Відхилення зусилля пресування від встановдених меж	Проблеми з параметрами налаштування обладнання	Фізичний (розпадання), ВЕРХ (розчинення)	4	4	3	48
Фасування, пакування та маркування	Недостатність пакування, невідповідність маркування на блістерах і пачках	Проблеми з параметрами налаштування лінії пакування	Кількість таблеток в блістері, герметичність упаковки	3	1	3	9
Готова продукція	Невідповідність вимогам МКЯ	Обов'язковий контроль готової продукції	Контроль якості ГЛФ відповідно до МКЯ та специфікації, сертифікат якості	5	3	2	30

Результати оцінювання ризику показують, що стадії Приготування таблетмаси і Фасування, пакування та маркування виробничого процесу мають суттєвий ступінь ризику, що є прийнятним. А всі інші стадії технологічного процесу є критичними і впливають на всі CQA.

Розробка коригувальних й запобіжних заходів для критичних точок

Управління будь-яким процесом можливе лише за умови визначення його оптимальних режимів, визначення критичних точок і розроблення методів їх контролю для моніторингу й коригування. Беручи до уваги оцінені ризики, під час розробки препарату на основі ТДС для критичних етапів визначено небезпечні фактори та можливі контрольні параметри, що дозволяють контролювати кожен фактор, розроблено запобіжні та коригувальні заходи з усунення можливого ризику. З метою усунення і запобігання ризику було розроблено коригувальні й запобіжні заходи для всіх критичних точок.

Отже, отримані дані оцінювання ризику є дієвим інструментом на етапі контролю ризику для вжиття заходів зі зниження і/або прийняття ризиків.

Висновки

Запропоновано алгоритм проведення досліджень на етапі преформуляції.

На етапі фармацевтичної розробки (ФР) із застосуванням методології управління ризиками для якості ідентифіковано фактори ризиків щодо продукту на основі ТДС, а також оцінено ризики для забезпечення якості процесу виробництва препарату в умовах фармацевтичного підприємства. Визначено потенційні критичні показники якості препарату та оцінено їхню критичність. Визначено критичні показники якості вихідних компонентів і властивостей продукту, ідентифіковано, проаналізовано та оцінено найбільш імовірні ризики для якості препарату на етапі ФР. Виявлено та обґрунтовано фактори ризику, які характерні для досліджуваного процесу і які впливають на якість процесу виробництва лікарського препарату. Згідно оцінки ризиків заплановано проведення досліджень, спрямованих на зниження високих та середніх ризиків варіабельності формуляції та виробничого процесу до низького рівня. Подальші дослідження доцільно спрямувати на планування дизайну експерименту та визначення простору проєктних рішень, а також визначення найважливіших контрольних точок технологічного процесу препарату.

Список використаної літератури

1. L Chaves, L., CC Vieira, A., Reis, S., Sarmento, B., & C Ferreira, D. (2014). Quality by design: discussing and assessing the solid dispersions risk. Current Drug Delivery, 11(2), 253-269. DOI:10.2174/15672018116661402111109432. Allawadi D., Singh N., Singh S. (2013). Solid dispersions: a review on drug delivery system and solubility enhancement. Ini. J. Pharm. Sci. Res., volume. 4, issue. 6, 2094-2105. http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.4(6).2094-05

3. Bashir, M.A., Khan, A., Shah, S.I., Ullah, M., Khuda, F., Abbas, M., ... & Ming, L.C. (2023). Development and evaluation of self-emulsifying drug-delivery system–based tablets for simvastatin, a BCS Class II Drug. Drug Design, Development and Therapy, 261–272. doi: https://doi.org/10.2147/DDDT.S377686

4. Nurhikmah, W., Sumirtapura, Y.C., & Pamudji, J.S. (2016). Dissolution profile of mefenamic acid solid dosage forms in two compendial and biorelevant (FaSSIF) media. Scientia Pharmaceutica, 84(1), 181–190. https://doi.org/10.3797/scipharm.ISP.2015.09

5. Swathi, C.H., Subrahmanyam, C.V.S., Kedarnath, S.A., & Babu, P.S. (2011). Solubilization of mefenamic acid. International Journal of PharmTech Research, 3, 3267–3276.

6. Sid, D., Baitiche, M., Elbahri, Z., Djerboua, F., Boutahala, M., Bouaziz, Z., & Le Borgne, M. (2021). Solubility enhancement of mefenamic acid by inclusion complex with β-cyclodextrin: in silico modelling, formulation, characterisation, and in vitro studies. Journal of enzyme inhibition and medicinal chemistry, 36(1), 605–617. https://doi.org/10.1080/14756366.2020.1869225

7. Putranti, W., Widiyastuti, L., & Ulfani, F. (2019). Enhancing the dissolution rate of mefenamic acid with solid dispersion system using avicel PH-101. Pharmaciana, 9(1), 119–128. https://doi.org/10.12928/pharmaciana.v9i1.10809

8. Pramod, K., Tahir, M. A., Charoo, N. A., Ansari, S.H., & Ali, J. (2016). Pharmaceutical product development: A quality by design approach. International journal of pharmaceutical investigation, 6(3), 129. doi: https://doi.org/10.4103/2230-973X.187350

9. Khan, A., Naquvi, K.J., Haider, M.F., & Khan, M.A. (2024). Quality by design-newer technique for pharmaceutical product development. Intelligent Pharmacy, 2(1), 122–129. https://doi.org/10.1016/j.ipha.2023.10.004

10. Zagalo, D.M., Silva, B.M., Silva, C., Simoes, S., & Sousa, J.J. (2022). A quality by design (QbD) approach in pharmaceutical development of lipid-based nanosystems: A systematic review. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 70, 103207. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103207

11. Waghule, T., Dabholkar, N., Gorantla, S., Rapalli, V.K., Saha, R.N., & Singhvi, G. (2021). Quality by design (QbD) in the formulation and optimization of liquid crystalline nanoparticles (LCNPs): A risk based industrial approach. Biomedicine & Pharmacotherapy, 141, 111940. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111940

12. Mohseni-Motlagh, S. F., Dolatabadi, R., Baniassadi, M., & Baghani, M. (2023). Application of the Quality by Design Concept (QbD) in the Development of Hydrogel-Based Drug Delivery Systems. Polymers, 15(22), 4407. https://doi.org/10.3390/polym15224407

13. Sangshetti, J. N., Deshpande, M., Zaheer, Z., Shinde, D. B., & Arote, R. (2017). Quality by design approach: Regulatory need. Arabian Journal of chemistry, 10, S3412–S3425. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.01.025

14. Chudiwal, S. S., & Dehghan, M. H. G. (2018). Quality by design (QbD) approach for design and development of drug-device combination products: a case study on flunisolide nasal spray. Pharmaceutical Development and Technology, 23(10), 1077–1087. https://doi.org/10.1080/10837450.2016.1236130

15. Aksu, B., Paradkar, A., de Matas, M., Özer, Ö., Güneri, T., & York, P. (2013). A quality by design approach using artificial intelligence techniques to control the critical quality attributes of ramipril tablets manufactured by wet granulation. Pharmaceutical development and technology, 18(1), 236–245. doi: https://doi.org/10.3109/10837450.2012.705294

16. Simão, J., Chaudhary, S. A., & Ribeiro, A. J. (2023). Implementation of quality by design (QbD) for development of bilayer tablets. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 184, 106412. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejps.2023.106412

17. Sweetman S. C. Martindale The Complete Drug Reference. Vol. 80. London: Pharmaceutical Press; 2009.

18. Abdul Mudalip, S. K., Abu Bakar, M. R., Jamal, P., & Adam, F. (2018). Prediction of mefenamic acid solubility and molecular interaction energies in different classes of organic solvents and water. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(2), 762–770.

19. Patil P. B., Gupta V. R. M., Udupi R. H., Srikanth K., Prasad B. S. G. Development of dissolution medium for poorly water soluble drug mefenamic acid. Res J. Pharm. Biol. Chem. Sci. 2010;1:544–549.

20. Modi S. V., Patel N. J. Development and evaluation of self emulsifying drug delivery of a poorly water soluble NSAID. World J. Pharm. Pharm. Sci. 2015; 4: 462–479.

21. Нормативно-директивні документи МОЗ України. (2018). Інструкція для медичного застосування лікарського засобу КСАРЕЛТО®. https://mozdocs.kiev.ua/likiview.php?id=46295

22. Ludescher, J. (2012). EP2404920A1. Crystalline form of Rivaroxaban dehydrate. European Patent Office. https://patents.google.com/patent/EP2404920A1/en

23. Dezena, R. M. B., & Rosa, P. C. P. (2024). Unlocking the polymorphic odyssey of Rivaroxaban: a journey of pharmaceutical innovation. Pharm Pharmacol Int J, 12(2), 65–67. DOI: https://doi.org/10.15406/ppij.2024.14.00434

24. Jeong, J. S., Ha, E. S., Park, H., Lee, S. K., Kim, J. S., & Kim, M. S. (2022). Measurement and correlation of solubility of rivaroxaban in dichloromethane and primary alcohol binary solvent mixtures at different temperatures. Journal of Molecular Liquids, 357, 119064.

25. Kushwah, V., Arora, S., Tamás Katona, M., Modhave, D., Fröhlich, E., & Paudel, A. (2021). On absorption modeling and food effect prediction of rivaroxaban, a BCS II drug orally administered as an immediate-release tablet. Pharmaceutics, 13(2), 283. doi: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13020283

26. Meng, Y., Tan, F., Yao, J., Cui, Y., Feng, Y., Li, Z., ... & Gao, C. (2022). Preparation, characterization, and pharmacokinetics of rivaroxaban cocrystals with enhanced in vitro and in vivo properties in beagle dogs. International Journal of Pharmaceutics: X, 4, 100119. https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2022.100119

27. Djuris, J., Ibric, S., & Đurić, Z. (2024). Quality by design in the pharmaceutical development. In Computer-aided applications in pharmaceutical technology (pp. 1–21). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18655-4.00003-0

28. Tomuta, I., Porfire, A., Iurian, S., & Casian, T. (2024). Optimization techniques in pharmaceutical formulation and processing. In Dosage Forms, Formulation Developments and Regulations (pp. 257-284). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91817-6.00014-0.

29. Lilli, G., Sanavia, M., Oboe, R., Vianello, C., Manzolaro, M., De Ruvo, P. L., & Andrighetto, A. (2024). A semi-quantitative risk assessment of remote handling operations on the SPES Front-End based on HAZOP-LOPA. Reliability Engineering & System Safety, 241, 109609. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109609

30. Friederich, J., & Lazarova-Molnar, S. (2024). Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. Journal of Manufacturing Systems, 72, 38–58. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001

References

1. L Chaves, L., CC Vieira, A., Reis, S., Sarmento, B., & C Ferreira, D. (2014). Quality by design: discussing and assessing the solid dispersions risk. Current Drug Delivery, 11(2), 253–269. DOI: https://doi.org/10.2174/1567201811666140211110943

2. Allawadi D., Singh N., Singh S. (2013). Solid dispersions: a review on drug delivery system and solubility enhancement. Ini. J. Pharm. Sci. Res., volume. 4, issue. 6, 2094–2105. http://dx.doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.4(6).2094-05

3. Bashir, M.A., Khan, A., Shah, S.I., Ullah, M., Khuda, F., Abbas, M., ... & Ming, L. C. (2023). Development and evaluation of self-emulsifying drug-delivery system–based tablets for simvastatin, a BCS Class II Drug. Drug Design, Development and Therapy, 261-272. doi: https://doi.org/10.2147/DDDT.S377686

4. Nurhikmah, W., Sumirtapura, Y.C., & Pamudji, J.S. (2016). Dissolution profile of mefenamic acid solid dosage forms in two compendial and biorelevant (FaSSIF) media. Scientia Pharmaceutica, 84(1), 181–190. https://doi.org/10.3797/scipharm.ISP.2015.09

5. Swathi, C.H., Subrahmanyam, C.V.S., Kedarnath, S.A., & Babu, P.S. (2011). Solubilization of mefenamic acid. International Journal of PharmTech Research, 3, 3267–3276.

6. Sid, D., Baitiche, M., Elbahri, Z., Djerboua, F., Boutahala, M., Bouaziz, Z., & Le Borgne, M. (2021). Solubility enhancement of mefenamic acid by inclusion complex with β-cyclodextrin: in silico modelling, formulation, characterisation, and in vitro studies. Journal of enzyme inhibition and medicinal chemistry, 36(1), 605-617. https://doi.org/10.1080/14756366.2020.1869225

7. Putranti, W., Widiyastuti, L., & Ulfani, F. (2019). Enhancing the dissolution rate of mefenamic acid with solid dispersion system using avicel PH-101. Pharmaciana, 9(1), 119-128. https://doi.org/10.12928/pharmaciana.v9i1.10809

8. Pramod, K., Tahir, M.A., Charoo, N.A., Ansari, S.H., & Ali, J. (2016). Pharmaceutical product development: A quality by design approach. International journal of pharmaceutical investigation, 6(3), 129. doi: https://doi.org/10.4103/2230-973X.187350

9. Khan, A., Naquvi, K.J., Haider, M.F., & Khan, M.A. (2024). Quality by design-newer technique for pharmaceutical product development. Intelligent Pharmacy, 2(1), 122–129. https://doi.org/10.1016/j.ipha.2023.10.004.

10. Zagalo, D.M., Silva, B.M., Silva, C., Simoes, S., & Sousa, J.J. (2022). A quality by design (QbD) approach in pharmaceutical development of lipid-based nanosystems: A systematic review. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 70, 103207. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103207

11. Waghule, T., Dabholkar, N., Gorantla, S., Rapalli, V.K., Saha, R.N., & Singhvi, G. (2021). Quality by design (QbD) in the formulation and optimization of liquid crystalline nanoparticles (LCNPs): A risk based industrial approach. Biomedicine & Pharmacotherapy, 141, 111940. https://doi.org/10.1016/j.biopha.2021.111940

12. Mohseni-Motlagh, S.F., Dolatabadi, R., Baniassadi, M., & Baghani, M. (2023). Application of the Quality by Design Concept (QbD) in the Development of Hydrogel-Based Drug Delivery Systems. Polymers, 15(22), 4407. https://doi.org/10.3390/polym15224407

13. Sangshetti, J.N., Deshpande, M., Zaheer, Z., Shinde, D.B., & Arote, R. (2017). Quality by design approach: Regulatory need. Arabian Journal of chemistry, 10, S3412-S3425. https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.01.025

14. Chudiwal, S.S., & Dehghan, M.H.G. (2018). Quality by design (QbD) approach for design and development of drug-device combination products: a case study on flunisolide nasal spray. Pharmaceutical Development and Technology, 23(10), 1077–1087. https://doi.org/10.1080/10837450.2016.1236130

15. Aksu, B., Paradkar, A., de Matas, M., Özer, Ö., Güneri, T., & York, P. (2013). A quality by design approach using artificial intelligence techniques to control the critical quality attributes of ramipril tablets manufactured by wet granulation. Pharmaceutical development and technology, 18(1), 236–245. doi: https://doi.org/10.3109/10837450.2012.705294

16. Simão, J., Chaudhary, S.A., & Ribeiro, A.J. (2023). Implementation of quality by design (QbD) for development of bilayer tablets. European Journal of Pharmaceutical Sciences, 184, 106412. doi: https://doi.org/10.1016/j.ejps.2023.106412

17. Sweetman SC. Martindale The Complete Drug Reference. Vol. 80. London: Pharmaceutical Press; 2009.

18. Abdul Mudalip, S.K., Abu Bakar, M.R., Jamal, P., & Adam, F. (2018). Prediction of mefenamic acid solubility and molecular interaction energies in different classes of organic solvents and water. Industrial & Engineering Chemistry Research, 58(2), 762–770.

19. Patil PB, Gupta VRM, Udupi RH, Srikanth K, Prasad BSG. Development of dissolution medium for poorly water soluble drug mefenamic acid. Res J Pharm Biol Chem Sci. 2010; 1: 544–549.

20. Modi SV, Patel NJ. Development and evaluation of self emulsifying drug delivery of a poorly water soluble NSAID. World J Pharm Pharm Sci. 2015; 4: 462–479.

21. Regulatory and policy documents of the Ministry of Health of Ukraine.. (2018). Medical Instructions for Xarelto®. https://mozdocs.kiev.ua/likiview.php?id=46295

22. Ludescher, J. (2012). EP2404920A1. Crystalline form of Rivaroxaban dehydrate. European Patent Office. https://patents.google.com/patent/EP2404920A1/en

23. Dezena, R.M.B., & Rosa, P.C.P. (2024). Unlocking the polymorphic odyssey of Rivaroxaban: a journey of pharmaceutical innovation. Pharm Pharmacol Int J, 12(2), 65–67. DOI: https://doi.org/10.15406/ppij.2024.14.00434

24. Jeong, J.S., Ha, E.S., Park, H., Lee, S.K., Kim, J.S., & Kim, M.S. (2022). Measurement and correlation of solubility of rivaroxaban in dichloromethane and primary alcohol binary solvent mixtures at different temperatures. Journal of Molecular Liquids, 357, 119064.

25. Kushwah, V., Arora, S., Tamás Katona, M., Modhave, D., Fröhlich, E., & Paudel, A. (2021). On absorption modeling and food effect prediction of rivaroxaban, a BCS II drug orally administered as an immediate-release tablet. Pharmaceutics, 13(2), 283. doi: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics13020283

26. Meng, Y., Tan, F., Yao, J., Cui, Y., Feng, Y., Li, Z., ... & Gao, C. (2022). Preparation, characterization, and pharmacokinetics of rivaroxaban cocrystals with enhanced in vitro and in vivo properties in beagle dogs. International Journal of Pharmaceutics: X, 4, 100119. https://doi.org/10.1016/j.ijpx.2022.100119

27. Djuris, J., Ibric, S., & Đurić, Z. (2024). Quality by design in the pharmaceutical development. In Computer-aided applications in pharmaceutical technology (pp. 1–21). Woodhead Publishing. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-18655-4.00003-0.

28. Tomuta, I., Porfire, A., Iurian, S., & Casian, T. (2024). Optimization techniques in pharmaceutical formulation and processing. In Dosage Forms, Formulation Developments and Regulations (pp. 257-284). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91817-6.00014-0

29. Lilli, G., Sanavia, M., Oboe, R., Vianello, C., Manzolaro, M., De Ruvo, P. L., & Andrighetto, A. (2024). A semi-quantitative risk assessment of remote handling operations on the SPES Front-End based on HAZOP-LOPA. Reliability Engineering & System Safety, 241, 109609. https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109609

30. Friederich, J., & Lazarova-Molnar, S. (2024). Reliability assessment of manufacturing systems: A comprehensive overview, challenges and opportunities. Journal of Manufacturing Systems, 72, 38-58. https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.11.001

УДК 633.522:664.3.032 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.22

Д. О. ПЕТРАЧЕНКО
кандидат технічних наук,
викладач відділення агроінженерії
Відокремлений структурний підрозділ «Глухівський агротехнічний фаховий коледж
Сумського національного аграрного університету»
ORCID: 0000-0002-1347-9562

ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКОСТІ ЦИКЛІВ ОБРУШУВАННЯ НАСІННЯ ПРОМИСЛОВИХ КОНОПЕЛЬ У ВІДЦЕНТРОВОМУ МЕХАНІЗМІ

Обрушування насіння промислових конопель є важливим етапом його переробки, оскільки сприяє підвищенню біодоступності поживних речовин і розширює можливості використання у харчовій промисловості. У дослідженні розглянуто процес багаторазового пропуску насіння промислових конопель через відцентровий обрушувальний механізм із закритим робочим колесом та оцінено ефективність обрушування на різних етапах технологічного процесу. Для експерименту використовували насіння промислових конопель чотирьох зразків, вирощених у ґрунтово-кліматичних умовах Сумської області, які відрізнялися рівнем вологості (8,9–11,5 %) та масою 1000 насінин (18,32–19,49 г). Обрушування здійснювали без попереднього калібрування, а після кожного циклу визначали кількість недорушеного насіння та вихід готового ядра. Встановлено, що ефективність обрушування значною мірою залежить від фізико-механічних характеристик насіння, зокрема вологості, розміру та маси 1000 насінин. Підвищена вологість сприяє збільшенню пластичності оболонки, що ускладнює її руйнування під дією ударного навантаження. Водночас зменшення розміру насіння призводить до нерівномірного розподілу механічного навантаження, що збільшує кількість недорушеного насіння та вимагає більшої кількості циклів для досягнення необхідного рівня обрушування. Результати показали, що після першого циклу кількість недорушеного насіння залишалася високою (63,73–76,41 %), що потребувало повторної обробки. Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що після третього циклу понад 80 % початкової маси насіння зазнало обрушування, а подальші цикли незначно покращували результат, але були економічно недоцільними. Оптимальною кількістю циклів для ефективного обрушування визначено три, оскільки саме після цього етапу відбувається максимальне вилучення ядра за мінімальних витрат ресурсів. На основі отриманих результатів запропоновано спрямувати подальші дослідження на вдосконалення конструкції робочого колеса обрушувального механізму для зменшення необхідної кількості циклів та підвищення ефективності процесу.

Ключові слова: *промислові коноплі, обрушування, відцентровий механізм, насіння, вихід ядра, цикли обрушування.*

D. O. PETRACHENKO
Candidate of Technical Sciences,
Lecturer at the Department of Agroengineering
Separate Structural Subdivision “Hlukhiv Agrotechnical Professional College
of Sumy National Agrarian University”
ORCID: 0000-0002-1347-9562

STUDY OF THE NUMBER OF SHELLING CYCLES OF INDUSTRIAL HEMP SEEDS IN A CENTRIFUGAL MECHANISM

Hemp seed shelling is an essential stage of its processing, as it enhances the bioavailability of nutrients and expands its potential use in the food industry. This study examines the process of multiple passes of industrial hemp seeds through a centrifugal shelling mechanism with a closed impeller and evaluates the shelling efficiency at different stages of the technological process. For the experiment, hemp seeds from four different samples grown under the soil and climatic conditions of Sumy region were used. These samples varied in moisture content (8.9–11.5 %) and 1000-seed mass (18.32–19.49 g). The shelling process was conducted without prior seed calibration, and after each cycle, the amount of unshelled seeds and the yield of shelled kernels were determined. It was established that shelling efficiency largely depends on the physico-mechanical characteristics of the seeds, particularly moisture content, size, and 1000-seed mass. Increased moisture content enhances the plasticity of the seed coat, making it more difficult to break under impact loading. At the same time, a smaller seed size leads to an uneven distribution of mechanical stress, increasing the amount of unshelled seeds and requiring a higher number of shelling cycles to achieve the desired level of kernel separation. The results showed that after the first cycle, the percentage of unshelled seeds remained high (63.73–76.41 %), requiring additional processing. Data analysis revealed that after the third cycle, more than 80 % of the initial seed mass had undergone shelling, while further cycles had minimal impact on the final outcome and were economically inefficient. The optimal number of cycles for effective shelling was determined to be three, as this stage provides the maximum kernel yield with minimal resource

consumption. Based on the obtained results, it is recommended to direct further research towards improving the design of the shelling mechanism's impeller to reduce the required number of cycles and increase process efficiency.

Key words: *industrial hemp, shelling, centrifugal mechanism, seeds, kernel yield, shelling cycles.*

Постановка проблеми

Переробка насіння промислових конопель набуває все більшого значення, особливо в контексті технології обрушування, яка дозволяє відокремити ядро від зовнішньої оболонки. Традиційно обрушування використовувалося у виробництві рослинних олій для видалення небажаних компонентів, що негативно впливають на якість кінцевого продукту. Проте останнім часом сфера його застосування розширюється. У харчовій промисловості основна мета обрушування полягає у підвищенні біодоступності поживних речовин, що містяться у насіннєвому ядрі. Видалення оболонки сприяє ефективнішому засвоєнню корисних компонентів, що підвищує харчову цінність продукту.

Переробка насіння промислових конопель шляхом обрушування залишається відносно новим напрямом, що потребує детального вивчення. Існує нестача даних щодо оптимальних технологічних режимів та вибору обладнання для цього процесу. Тому науково обґрунтований вибір методу та параметрів обрушування є актуальним завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню ефективності переробки насіння конопель.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Переробка насіння шляхом обрушування відбувається із застосуванням машин, обладнаних різними типами робочих органів. Раціональний вибір конкретного типу робочого органу сприяє отриманню продукту високої якості та зменшує втрати на кожному етапі технологічного процесу. Вибір конкретного способу обрушування залежить від фізико-механічних властивостей насіння та біологічних особливостей культури, які можуть значно варіюватися навіть у межах одного сорту [1–2].

Серед відомих методів обрушування використовуються: тертя [3], розчавлювання [4], розколювання [5], неорієнтований багатократний [6–7] та орієнтовний однократний [8] удар. Кожен з методів ефективний для певних культур, однак не може вважатися універсальним. Наприклад, орієнтовний однократний удар відзначається високою продуктивністю та економічністю, що робить його привабливим для обрушування зерна спельти [9], плодів тунгового дерева [10] та волоських горіхів [11]. В основі цього методу лежить використання кінетичної енергії обертального руху, що забезпечує швидке відділення оболонки від ядра. Даний метод реалізовано у відцентрових механізмах.

Розроблений відцентровий механізм [12] показав високу ефективність і при обрушуванні насіння промислових конопель. Використання механізму забезпечує ефективну переробку та виділення ядра без попереднього калібрування насіння та регулювання його вологості. Він дозволяє отримувати вихід готового ядра в межах 28,0–38,0 % із засміченістю до 1,0 %.

Незважаючи на ефективність відцентрових обрушувачів, їх конструкційні параметри потребують подальшої оптимізації. Одним із ключових напрямів досліджень є визначення впливу кількості циклів пропуску конопляного насіння через механізм на процес обрушування та вихід ядра. Аналіз цього аспекту дозволить встановити оптимальні режими роботи обладнання та простежити особливості відокремлення оболонки на кожному етапі обрушування. Отримані результати сприятимуть формуванню науково обґрунтованих рекомендацій щодо вдосконалення технологічного процесу.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є визначення оптимальної кількості циклів обрушування партії насіння промислових конопель у відцентровому механізмі для забезпечення максимального виходу ядра.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для проведення дослідження використовували насіння промислових конопель чотирьох зразків, вирощене в грунтово-кліматичних умовах Сумської області. Зразки відрізнялися сортовою приналежністю, фізико-механічними характеристиками та умовами культивування, оскільки були вирощені на різних полях. Характеристика насіння представлена в табл. 1.

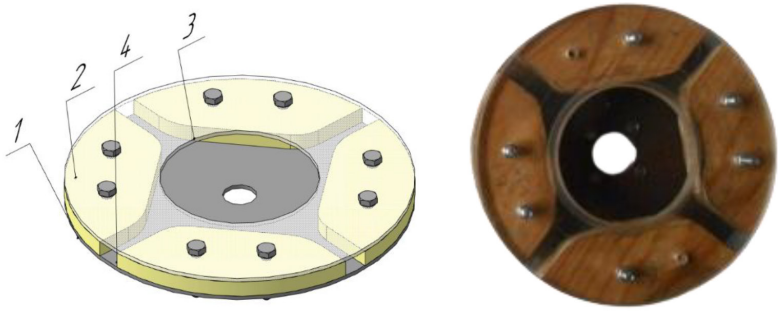
Таблиця 1

Характеристика насіння промислових конопель

Показник	Номер зразка			
	Зразок 1	Зразок 2	Зразок 3	Зразок 4
Вологість, %	8,9	9,3	9,2	11,5
Маса 1000 шт., гр	19,40	19,49	18,32	18,40
Пошкоджене насіння, %				
тріснуте	5,59	7,80	7,79	1,68
частково розрушене	0,94	1,25	1,24	0,47
Засміченість, %				
лушпиння	0,01	0,14	0,01	0,07
ядро	0,19	0,46	2,08	0,54

Відмітимо (табл. 1), що вологість зразків насіння варіювалася від 8,9 % до 11,5 %, що може впливати на процес обрушування. Маса 1000 штук насінин коливалася в межах 18,32–19,49 г, що свідчить про відмінності у структурних особливостях насіння. Засміченість зразків насіння лушпинням була незначною (0,01–0,14 %), однак вміст домішок ядра варіювався від 0,19 % до 2,08 %. У всіх без виключення досліджених зразках наявне в тій чи іншій кількості (1,68–7,80 %) пошкоджене насіння. Наявність пошкодженого насіння може бути результатом впливу робочих органів машин задіяних під час збирання та первинної доробки урожаю.

Обрушування насіння конопель проводили без попереднього калібрування насіння з використанням розробленого відцентрового пристрою [13]. Робочим органом пристрою є робоче колесо закритого секторального типу (рис. 1). Робоче колесо складається з двох дисків. Нижній диск має технологічний отвір для кріплення через маточину на вал електродвигуна. Верхній диск має завантажувальний отвір для подачі насіння. Між дисками знаходяться чотири сектори. В поєднанні диски та сектори разом утворюють чотири радіальні профільні отвори з гіперболічною формою бічних поверхонь, по яких рухається насіння.



а *б*

Рис. 1. Схема (*а*) та загальний вигляд (*б*) робочого колеса: 1 – нижній диск; 2 – верхній диск; 3 – завантажувальний отвір; 4 – профільний канал

Частота обертання робочого колеса в дослідах знаходилася в межах 6000 ± 200 хв$^{-1}$. Насіння подавалося зверху у вільному сипучому стані в завантажувальний отвір робочого колеса. Швидкість подачі 100 кг/год. Кожний зразок обрушували окремо. Кількість повторів для кожного зразка насіння п’ятикратна. Маса окремої наважки складала 1000 грамів. Процес обрушування насіння здійснювали шляхом багаторазового пропуску кожної наважки через експериментальний пристрій. У результаті утворювалася рушанка, що далі підлягала розділенню. Рушанку розділяли на зерноочисній машині (повітряно-решітний сепаратор) на такі фракції: 1 – недорушене та пошкоджене насіння; 2 – готові ядра; 3 – відходи.

Процес обрушування полягав в наступному. Зразок насіння пропускали через пристрій (перший цикл). Після обрушування одержану рушанку направляли на розділення в повітряно-решітний сепаратор. Виділене в процесі сепарації недорушене та пошкоджене насіння повторно піддавали обрушуванню (другий цикл). Всього для одного зразка використовували п’ять циклів. Оцінку ефективності процесу проводили після кожного циклу, аналізуючи співвідношення між обсягами недорушеного насіння, виділених ядер та відходів. Оброблення отриманих даних проводили в програмному середовищі Microsoft Excel відповідно до методики [14].

Результати обрушування насіння по циклах представлені на рис. 2–3.

Відмітимо значний вплив фізико-механічних характеристик насіння на ефективність процесу обрушування. Високий рівень вологості насіння сприяє підвищенню пластичності оболонки, що ускладнює її механічне руйнування в умовах ударного навантаження. Зменшення розміру насіння зумовлює нерівномірний розподіл ударного навантаження, що ускладнює процес відокремлення оболонки, збільшує кількість недорушеного насіння та потребує більшої кількості циклів для обрушування.

Аналіз зміни кількості обрушеного насіння (рис. 2) показує, що після першого циклу найбільший відсоток недорушеного насіння зафіксовано у зразків 3 (75,11 %) та 4 (76,41 %), що може бути наслідком їх меншої маси та підвищеної вологості. У зразків 1 та 2 цей показник був нижчим (68,58 % та 63,73 % відповідно), що свідчить про їхню кращу здатність до обрушування. Проте подальший розгляд даних демонструє, що після третього циклу 78–89 % початкової маси партії насіння вже зазнало обрушування і подальші цикли суттєво не змінюють кінцевий результат.

Аналіз зміни виходу ядра (рис. 3) показує, що після першого циклу максимальний вихід ядра спостерігався у зразка 2 (14,58 %), що може пояснюватися його найбільшою масою 1000 насінин (19,49 г) та оптимальним рівнем вологості (9,3 %). Натомість зразок 3 демонстрував найменший вихід ядра (10,32 %), що узгоджується з його підвищеним рівнем недорушу та меншою масою насінин.

У наступних циклах вихід ядра збільшувався, але після третього циклу приріст ставав значно меншим. Так у зразка 1 між другим та третім циклом вихід ядра зріс на 10,08 %, а між третім і четвертим – лише на 4,28 %.

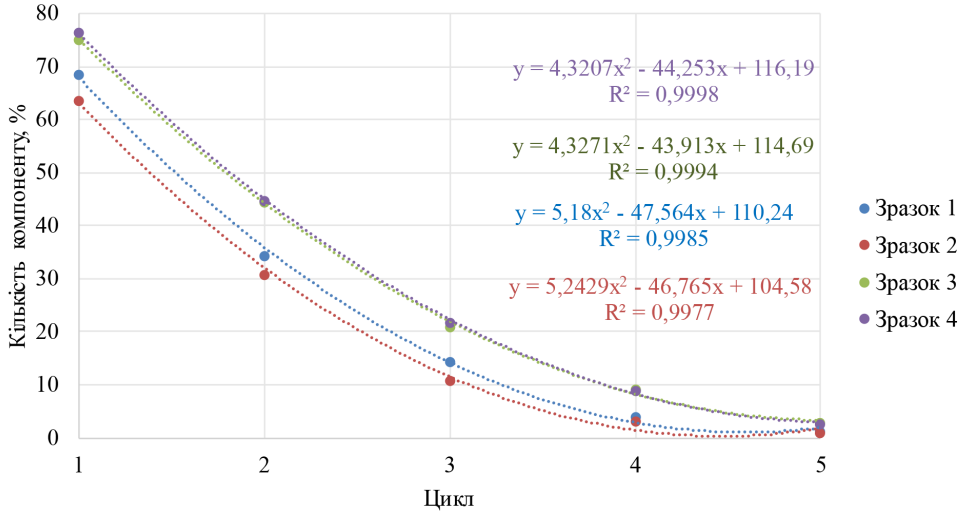


Рис. 2. Зміна кількості недорушеного насіння після кожного циклу обрушування

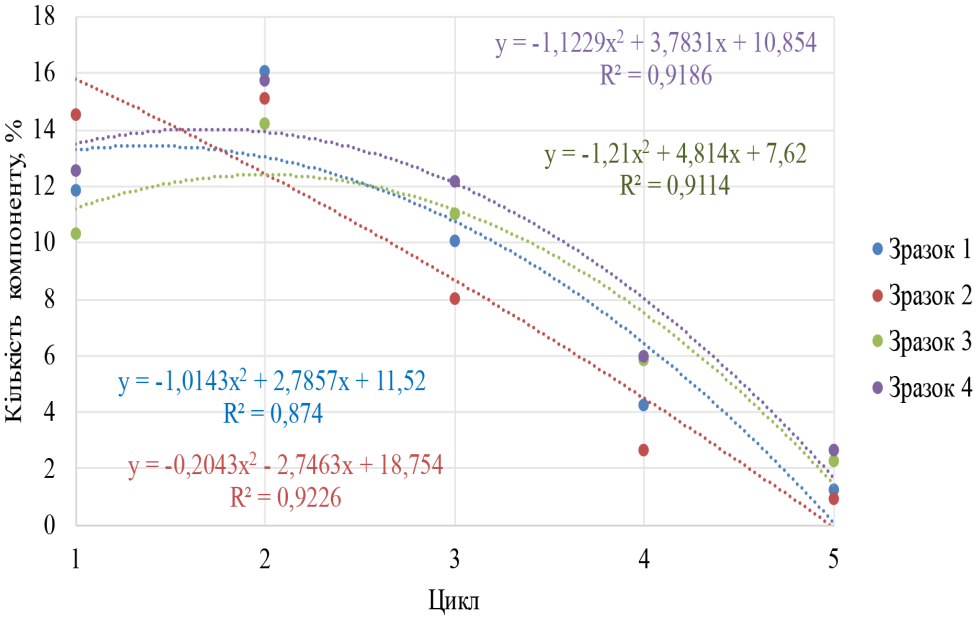


Рис. 3. Зміна виходу ядра після кожного циклу обрушування

Подібна тенденція спостерігається і для інших зразків, що свідчить про зниження ефективності подальшої переробки. Крім того, після третього циклу більша частина залишкового недорушу складалася з частково пошкоджених або важкообрушуваних насінин.

З огляду на отримані результати зазначимо, що для повного руйнування партії насіння, не залежно від його фізико-механічних характеристик, необхідно здійснити п’ять циклів. Однак проведення п’яти циклів обрушування не є доцільним з економічної точки зору. Оптимальним варіантом для ефективного обрушування є проведення трьох циклів. Адже саме після третього циклу отримали максимальний вихід ядра за мінімальних витрат ресурсів. Подальші цикли лише незначно покращують результати обрушування, але потребують додаткових енергетичних і часових затрат. Зокрема, п’ятий цикл дає приріст ядра менше ніж 3 %, що не компенсує витрати на додаткову переробку.

Висновки

Отримані результати підтверджують, що ефективність обрушування значною мірою залежить від вихідних фізико-механічних параметрів насіння. Насіння з вищою вологістю та меншою масою потребує більшої кількості циклів обрушування, тоді як насіння з більшою масою і середнім рівнем вологості демонструє кращі результати.

Збільшення кількості циклів обрушування сприяє поступовому зменшенню кількості недорушеного насіння та підвищенню виходу готового ядра. Однак аналіз динаміки процесу показав, що після третього циклу ефективність

подальшого обрушування суттєво знижується, а додаткові цикли не забезпечують значного приросту виходу ядра, що робить їх економічно недоцільними.

Список використаної літератури

1. Kabir A., Fedele O. (2018). A Review of Shelling, Threshing, De-Hulling and Decorticating Machines. Open Access Journal of Agricultural Research. 3. https://doi.org/10.23880/OAJAR-16000148
2. Prem Manjeet, Pragi S, Dabhi Kanak, Baria Anil. (2017). Pod Shelling Machines – A Review. International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR). 7. 321–326.
3. Manjunath M. Ullegaddi, N. C. Mahandra Babu, Abdul Rahman Faisal, Miraz Mohammad, M. S. Shreenidhi, Syeda Anjum, (2021) Design and development of compact Foxtail millet deshelling machine, Materials Today: Proceedings, Volume 42, Part 2, Pages 781–785, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.314
4. Hasantabar, S., Seyedi, S., Kalantari, D. (2019). Design, construction and evaluation of a seed pod husker and testing with soybean and mung bean. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal, 21, 90–99.
5. Kang, Di., Wang, Y., Fan, Y., Chen, Z. (2018). Research and development of Camellia oleifera fruit sheller and sorting machine. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042051
6. Brian Baker Dehulling Ancient Grains: Economic Considerations and Equipment. Available at: https://eorganic.org node/13028
7. Khodabakhshian, R., Bayati, M. R., Shakeri, M. (2011). Performance Evaluation of a Centrifugal Peeling System for Pistachio Nuts. International journal of food engineering. Volume7, Issue4. https://doi.org/10.2202/1556-3758.2135
8. Complex Oilseed Processing. Available at: https://www.farmet.cz/en/complex-oilseed-processing
9. Baker, B. (2015). Dehulling ancient grains: economic considerations and equipment. Retrieved January 08, 2025, from https://eorganic.org/node/13028
10. V. Sharma, R. C. Pradhan, S. N. Naik, N. Bhatnagar, Subedar Singh. Evaluation of a centrifugal impaction-type decorticator for shelling tung fruits. Industrial Crops and Products, Volume 43, 2013, Pages 126-131. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.046
11. Bernik, Rajko & Stajnko, Denis & Demšar, Ivan. (2020). Comparison of the Kernel Quality of Different Walnuts (Juglans regia L.) Varieties Shelled with Modified Centrifugal ShellerVergleich der Kernqualität von verschiedenen Walnusssorten, geschält mit modifiziertem Zentrifugalschäler. Erwerbs-Obstbau. 62. 10.1007/s10341-020-00473-2
12. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Shevchuk, M., & Sheichenko, D. (2024). Study of roller and centrifugal methods of hemp seed shelling. Agricultural Machines, 50, 37–47. https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1333
13. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., Shatrov, R. (2024). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (130)), 54–68. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869
14. Хайліс Г. А., Коновалюк Д. М. (1992) Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин. Київ : НМК ВО, 320 с.

References

1. Kabir A., Fedele O. (2018). A Review of Shelling, Threshing, De-Hulling and Decorticating Machines. Open Access Journal of Agricultural Research. 3. https://doi.org/10.23880/OAJAR-16000148
2. Prem Manjeet, Pragi S, Dabhi Kanak, Baria Anil. (2017). Pod Shelling Machines – A Review. International Journal of Agricultural Science and Research (IJASR). 7. 321–326.
3. Manjunath M. Ullegaddi, N. C. Mahandra Babu, Abdul Rahman Faisal, Miraz Mohammad, M. S. Shreenidhi, Syeda Anjum, (2021) Design and development of compact Foxtail millet deshelling machine, Materials Today: Proceedings, Volume 42, Part 2, Pages 781–785, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.314
4. Hasantabar, S., Seyedi, S., Kalantari, D. (2019). Design, construction and evaluation of a seed pod husker and testing with soybean and mung bean. Agricultural Engineering International: The CIGR Journal, 21, 90–99.
5. Kang, Di., Wang, Y., Fan, Y., Chen, Z. (2018). Research and development of Camellia oleifera fruit sheller and sorting machine. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/4/042051
6. Brian Baker Dehulling Ancient Grains: Economic Considerations and Equipment. Available at: https://eorganic.org/ node/13028
7. Khodabakhshian, R., Bayati, M. R., Shakeri, M. (2011). Performance Evaluation of a Centrifugal Peeling System for Pistachio Nuts. International journal of food engineering. Volume7, Issue4. https://doi.org/10.2202/1556-3758.2135
8. Complex Oilseed Processing. Available at: https://www.farmet.cz/en/complex-oilseed-processing
9. Baker, B. (2015). Dehulling ancient grains: economic considerations and equipment. Retrieved January 08, 2025, from https://eorganic.org/node/13028

10. V. Sharma, R.C. Pradhan, S.N. Naik, N. Bhatnagar, Subedar Singh. Evaluation of a centrifugal impaction-type decorticator for shelling tung fruits. Industrial Crops and Products, Volume 43, 2013, Pages 126–131. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.046.

11. Bernik, Rajko & Stajnko, Denis & Demšar, Ivan. (2020). Comparison of the Kernel Quality of Different Walnuts (Juglans regia L.) Varieties Shelled with Modified Centrifugal ShellerVergleich der Kernqualität von verschiedenen Walnusssorten, geschält mit modifiziertem Zentrifugalschäler. Erwerbs-Obstbau. 62. 10.1007/s10341-020-00473-2

12. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Shevchuk, M., & Sheichenko, D. (2024). Study of roller and centrifugal methods of hemp seed shelling. Agricultural Machines, 50, 37-47. https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1333

13. Sheichenko, V., Petrachenko, D., Rogovskii, I., Dudnikov, I., Shevchuk, V., Sheichenko, D., Derkach, O., Shatrov, R. (2024). Determining patterns in the separation of hemp seed hulls. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4 (1 (130)), 54–68. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.309869

14. Khailis H.A., Konovaliuk D.M. (1992) Osnovy proektuvannia i doslidzhennia silskohospodarskykh mashyn. Kyiv : NMK VO, 320 s.

УДК [656+681.5]:004.8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.23

В. О. ПОДОЛЯН
магістр, науковий співробітник у галузі морського транспорту
CRC TRANSPORT, Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0007-9109-6181

ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В АВТОМАТИЗАЦІЇ ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСІВ

Транспортні процеси постійно еволюціонують і вдосконалюються шляхом упровадження новітніх технологій. Основним способом покращення їх ефективності стає реалізація IT-рішень, які працюють за допомогою інтеграції алгоритмів штучного інтелекту (ШІ). В даному дослідженні була розглянута проблема використання технології ШІ в автоматизації транспортних процесів, для чого було проаналізовано низку публікацій українських та закордонних дослідників, що довело актуальність обраної теми. Метою цієї статті визначено оцінку перспектив та проблем використання технології ШІ в автоматизації транспортних процесів. Для здійснення такої оцінки був обраний приклад США, що аргументується особливостями цієї держави в контексті розвитку транспортної системи, серед яких: висока роль морського транспорту та найбільша протяжність залізничних колій.

Визначено ключові компоненти транспортного процесу та розглянуто їх зв'язок із залізницею та морським транспортом у США, що допомогло виявити функціонал ШІ в процесі автоматизації їх роботи. Останнє стало основою для аналізу перспективних напрямів використання технології ШІ в процесі автоматизації залізничного та морського транспорту.

Результати дослідження показали, що хоча застосування ШІ з метою автоматизації транспортних процесів є перспективним шляхом підвищення економічної ефективності перевізників, але його упровадження зумовлює необхідність навчання персоналу для роботи з застосунками, великі капіталовкладення в логістичні центри й інші інформаційні технології компанії та забезпечення протидії діяльності кіберзлочинців.

Практичним результатом дослідження стало обґрунтування власної системи інтеграції технології ШІ для автоматизації транспортних процесів у США, що включає встановлення чинників потенційних проблем та перспектив використання алгоритмів ШІ.

Перспективою наступних досліджені є здійснення аналізу особливостей автономізації транспортних процесів шляхом інтеграції ШІ з метою подальшого порівняння проблем і перспектив їх автоматизації та автономізації в контексті зменшення витрат часу та коштів при роботі над транспортним потоком.

Ключові слова: *автоматизація, транспортні процеси, штучний інтелект, алгоритми, залізничний транспорт, морський транспорт.*

V. O. PODOLIAN
Master Degree, Researcher in the Field of Maritime Transport
CRC TRANSPORT, Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0007-9109-6181

ARTIFICIAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN AUTOMATION OF TRANSPORT PROCESSES

Transport processes are continuously evolving and improving through the introduction of cutting-edge technologies. The primary method for enhancing their efficiency is the implementation of IT solutions that operate via the integration of artificial intelligence (AI) algorithms. This study examines the issue of employing AI technology in the automation of transport processes by analyzing a range of publications by both Ukrainian and international researchers, thereby demonstrating the relevance of the chosen topic. This article assesses the prospects and challenges of using AI technology to automate transport processes. For this evaluation, the example of the USA was selected, justified by the unique characteristics of this country's transportation system—among them, the significant role of maritime transport and the extensive railway network.

Key components of the transport process were identified, and their connection with rail and maritime transport in the USA was examined, which facilitated the identification of the functionalities of AI in automating their operations. This analysis was the foundation for exploring prospective directions for applying AI technology in automating railway and maritime transport.

The research findings indicate that, although the application of AI for automating transport processes is a promising approach to enhancing the economic efficiency of carriers, its implementation necessitates the training of personnel to operate the relevant applications, substantial capital investments in logistics centers, and other information technologies, as well as measures to counter cybercriminal activities.

A practical outcome of this study is the substantiation of a novel system for integrating AI technology into the automation of transport processes in the USA, which includes identifying the factors that could pose potential problems and the prospects

for utilizing AI algorithms. A promising direction for future research is to analyze the characteristics of transport process autonomization through AI integration and further compare the challenges and prospects of automation and autonomization in reducing time and cost expenditures in managing transport flows.

Key words: *automation, transport processes, artificial intelligence, algorithms, rail transport, maritime transport.*

Постановка проблеми

Стрімкий розвиток інформаційних технологій, який був характерний для початку двадцять першого століття, сприяв широкому застосуванню технологій штучного інтелекту у всіх сферах життя суспільства, однією з яких є робота транспортної системи. Транспортні процеси як функції транспортної системи при роботі над транспортним потоком є сукупністю складних операцій, які вимагають великих витрат грошей та часу, що робить їх часто недоступними для широкого кола потенційних користувачів. З метою зниження ціни транспортних процесів та зменшення зусиль, які необхідні для їх виконання, активно застосовуються ІТ-рішення, що містять у своїй основі низку алгоритмів ШІ. Оскільки процес упровадження ШІ в транспортні процеси почався тільки нещодавно, то питання його використання в ході їх автоматизації стало надзвичайно актуальним. У зв'язку з цим виникає необхідність в оцінці перспектив і проблем застосування технології ШІ в автоматизації транспортних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання автоматизації транспортних процесів за допомогою технології ШІ стало предметом розгляду багатьох вітчизняних та іноземних дослідників, попри його відносну новизну (близько десяти років). Серед українських науковців різні складові означеного питання розглядали В. Яровий, О. Піжук, Н. Кирлик, В. Богом'я, А. Гудзь, В. Голіков та К. Сінюта.

Економічна складова проблем автоматизації транспортних процесів за допомогою технології ШІ досліджувалась в працях В. Ярового [1] та О. Піжук [2].

В. Яровий довів позитивний вплив інтеграції ШІ в процес контейнерних перевезень, що реалізується шляхом підвищення конкурентоспроможності портів та судноплавних компаній [1]. У свою чергу, О. Піжук запропонувала використовувати технології ШІ для економії палива й електроенергії, що відбуватиметься за допомогою автоматизації транспортних засобів та основних маршрутних напрямків [2].

Н. Кирлик розглянула питання застосування алгоритмів ШІ в логістиці та визначила особливості їх інтеграції, які здатні реалізувати синергетичний ефект. Основою цього явища стає поєднання досвіду та здорового глузду й автоматизації повторюваних процесів [3].

В статті В. Голікова та К. Сінюти визначено, що інтеграція технології ШІ відкриває широкі можливості для автоматизації морського транспорту за рахунок оптимізації алгоритмів під виконання конкретних завдань [4].

Спільне дослідження В. Богом'я та А. Гудзя описує перспективи інтеграції технології ШІ в транспортні процеси через призму поліпшення стану транспортних потоків ы безпеки руху [5].

Серед іноземних дослідників, які досліджували проблематику автоматизації транспортних процесів за допомогою технології ШІ, треба зазначити А. Соланкі, С. Джадіга, Л. Айєр, Дж. Бхарадія, С. Чунг та Ф. Кугурулло.

А. Соланкі та С. Джадіга розглянули практичне застосування ШІ в багатьох важливих сферах сучасного управління ланцюгами постачань. Головними перевагами такого підходу, на думку дослідників, є економія палива та зменшення кількості аварій [6].

Особливості інтеграції ШІ в транспортну галузь, а саме управління дорожнім рухом, громадським транспортом, безпекою та логістикою стали предметом дослідження Л. Айєр [7].

У науковій розвідці Дж. Бхарадія проведено аналіз ролі ШІ у різних аспектах розумних міст, зокрема у сфері транспортних систем. Визначено, що алгоритми ШІ ефективно використовуються для таких завдань, як моделювання та симуляція, динамічна маршрутизація, керування заторами і трафіком [8].

Комплексний огляд застосування ШІ для покращення логістичних операцій та зростання ефективності управління транспортною мережею здійснив С. Чунг. Автор встановив, що інтеграція ШІ має не тільки переваги, але і недоліки, головним з яких є погана підготовка спеціалістів до роботи з новими технологіями [9].

Ф. Кугурулло дослідив зв'язок розвитку ШІ та концепції «розумного міста». Одним з головних напрямів покращення міського простору було визначено автоматизацію руху транспортних засобів шляхом їх автономізації [10].

На основі проведеного огляду наукових досліджень і публікацій було доведено зростаючу актуальність обраної теми, бо вона викликає жвавий інтерес, багатьох дослідників, а її практична реалізація допоможе зробити транспортні процеси дешевшими та менш затратними в контексті зусиль людини. Ця стаття дозволить обґрунтувати власну систему інтеграції технології ШІ для автоматизації транспортних процесів у США, яка буде включати чинники потенційних проблем і перспектив використання алгоритмів ШІ.

Формулювання мети дослідження

Метою даної статті є оцінка перспектив і проблем використання технології штучного інтелекту в автоматизації транспортних процесів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Перш за все необхідно розкрити суть поняття «транспортні процеси», оскільки це складна для реалізації і комплексна сукупність операцій для виконання яких, як правило, залучені велики колективи працівників. Транспортні процеси реалізуються стосовно транспортних засобів та їх частин, вантажів і пасажирів. Основні транспортні операції, які є складовими транспортного процесу наведено на Рисунку 1.

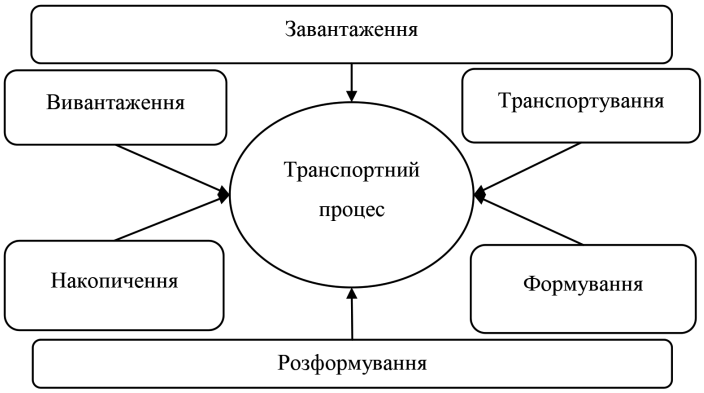


Рис. 1. Транспортні операції як складові транспортного процесу

Варто детально розглянути розформування та формування, бо вони є специфічними транспортними операціями, які здійснюються з залізничним транспортом в контексті роботи зі складом поїздів і вагонів на сортувальних станціях. Особливістю цих операцій є необхідність чіткої залізничної логістики, що вимагає ефективного державно-приватного партнерства. Найбільшою потенційною проблемою, яка не дозволяє якісно реалізувати залізничну логістику, є відсутність логістичних центрів, прикладом чого є ситуація в Україні [11]. Ситуація в США сильно різниться з українською, бо там залізниця є приватною, що дозволяє інвестувати в її роботу набагато більший обсяг коштів. Прикладом останнього твердження є те, що з моменту ухвалення Закону Стеггерса, приватні залізничні компанії в США витратили понад 700 мільярдів доларів на розвиток залізничної мережі. Мережа залізниць США є однією з найрозгалуженіших у світі, налічуючи понад 140 000 миль колій. Більшість цієї мережі належить та експлуатується підприємствами вантажного залізничного транспорту [12].

Сьогодні алгоритми ШІ активно інтегруються в повсякденну роботу великих залізничних компаній США, допомагаючи менеджерам приймати рішення щодо операційних планів. Оскільки залізниці переходять із систем на базі мейнфреймів на хмарні платформи з компонентами даних у реальному часі, то вони використовують алгоритми ШІ для прийняття рішень на основі отриманих даних [13]. Ключові функції ШІ в процесі автоматизації роботи залізничного транспорту наведено в Таблиці 1.

Таблиця 1

Функції ШІ в процесі автоматизації роботи залізниці

№	*Назва функції*	*Суть функції*
1	Розробка планів	Створення моделей, які можуть визначати рівні мережевих ресурсів, попит на залізничні перевезення, а також балансувати всі ці змінні для розробки найоптимальніших операційних планів
2	Подолання проблем неякісного графіку	Перехід від встановленого графіку руху до нового через такі події, як сходження з рейок потягів чи вагонів або погодні катаклізми
3	Визначення наслідків рішень працівників	Використання технології ШІ для розпізнавання всіх дій працівників залізниці та розрахунку каскаднних наслідків їх рішень
4	Обслуговування локомотивів	Телеметричні дані від виробників локомотивів або галузевих технологічних компаній передають інформацію на залізниці, допомагаючи їм розшифрувати тенденції технічного обслуговування певних моделей локомотивів ще перед їх можливою поломкою на колії
5	Контроль безпеки руху	Застосування ШІ для виявлення ризиків, пов'язаних із потенційними травмами від руху залізничного транспорту, які викликані людським чинником

Джерело: власна розробка автора.

Основними перспективними напрямами використання технології ШІ в автоматизації транспортних процесів американської залізниці є збір інформації і подальше прогнозування стану транспорту та вантажів. Таким чином для реалізації цього алгоритму необхідним є застосування сенсорів, що можуть записувати чисельні величини з їх подальшим записом у базу даних, яка аналізується засобами ШІ зі складенням наступного звіту та пропозиції дій щодо забезпечення цілісності транспорту та вантажу чи пасажирів.

Ще одним важливим видом транспорту, який дозволяє реалізувати транспортні операції в США є морський транспорт. США значною мірою покладаються на кораблі для забезпечення торгівельних потоків між собою та своїми партнерами. Майже шістдесят дев'ять відсотків усіх товарів, якими торгують США, транспортуються водними шляхами, переважно морськими суднами. У вартісному вираженні судна перевозять понад сорок один відсоток загальної вартості товарів, якими торгує американський бізнес [14]. ШІ все більше інтегрується в морські операції, щоб забезпечити підтримку прийняття рішень у режимі реального часу, підвищуючи їх ефективність і безпеку [15]. Ключові функції ШІ в процесі автоматизації роботи морського транспорту наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2

Функції ШІ в процесі автоматизації роботи морського транспорту

№	Назва функції	Суть функції
1	Навігація	Алгоритми ШІ допомагають приймати навігаційні рішення, щоб уникнути зіткнень і підвищити точність положення судна, тим самим підвищуючи безпеку навігації
2	Робота з небезпечними матеріалами	Інструменти на основі штучного інтелекту, які надають інформацію про правила розділення та сепарації небезпечних вантажів, усувають можливість людської помилки, тим самим запобігаючи ризику вибухів, пожеж і забруднення моря
3	Управління ресурсами екіпажу	Інструменти, які підтримують безперебійну роботу морської ы портової вахти, а також роботи з технічного обслуговування на судні, одночасно забезпечуючи дотримання вимог щодо часу відпочинку для екіпажу по відношенню до робочого часу
4	Прогнозування потреб технічного обслуговування	Алгоритми штучного інтелекту, які аналізують історичні дані перевірок і технічного обслуговування, покращують планування та управління майбутніми перевірками, усуваючи можливість пропуску необхідного ремонту та періодичного технічного обслуговування

Таким чином, використання ШІ в діяльності морського транспорту має більше напрямів реалізації ніж у роботі залізничного, що визначається особливостями першого.

Впровадження ШІ в процес автоматизації роботи морського транспорту та залізниці пов'язане з кількома проблемами. Інтеграція систем ШІ з існуючою морською та залізничною інфраструктурою може бути складним завданням через проблеми сумісності із застарілими системами. Часто необхідні значні модифікації та оновлення, що може бути трудомістким та потребувати значних інвестицій [16]. Крім того, ефективність прогнозного технічного обслуговування залежить від передачі даних у реальному часі, що може бути складним у віддалених середовищах з обмеженим зв'язком. Подолання цих труднощів вимагає значних інвестицій у технології та інфраструктуру.

На основі попередніх кроків було надано обґрунтування власної системи інтеграції технології ШІ для автоматизації транспортних процесів в США. Першим кроком упровадження ШІ має стати створення курсів навчання для працівників з використання нових алгоритмів. Далі необхідно визначити найзручніше ІТ-рішення, яке може задовольнити компанію перевізника. Після вибору ІТ-рішення важливо дослідити алгоритми ШІ, яке воно використовує, та проінформувати про його особливості менеджерів. Останнім кроком є створення фінансового плану, який дозволить зрозуміти вартість інтеграції конкретного ІТ-рішення чи іншого програмного забезпечення, що містить обрані алгоритми ШІ.

Висновки

Отже, попри те, що транспортні процеси вже давно вкоренилися в діяльності людини, вони зазнають стрімких трансформацій під впливом технологічного розвитку, прикладом чого є інтеграція алгоритмів ШІ.

Здійснений аналіз дозволив оцінити перспективи та проблеми використання технології ШІ в автоматизації транспортних процесів на основі даних залізниці та морського транспорту США. Було визначено, що перспективними напрямами використання технології ШІ в автоматизації транспортних процесів американської залізниці та морського транспорту є збір інформації і подальше прогнозування стану транспорту та вантажів.

Проблемами інтеграції технології ШІ в автоматизації транспортних процесів є застарілість вже існуючих інформаційних систем, низький рівень технічних навичок працівників і відсутність або ж примітивність необхідної інфраструктури.

Список використаної літератури

1. Яровий В. Теоретичні засади цифровізації контейнерних перевезень. *Економіка та суспільство*. 2024. № 66. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-136 (дата звернення: 15.02.2025).

2. Піжук О.І. Штучний інтелект як один із ключових драйверів цифрової трансформації економіки. *Економіка, управління та адміністрування*. 2019. № 3 (89). С. 41–46. URL: https://doi.org/10.26642/ema-2019-3(89)-41-46 (дата звернення: 15.02.2025).

3. Кирлик Н.Ю. «Штучний інтелект» та його використання в логістичних процесах. *Актуальні проблеми економіки*. 2021. № 243/244. С. 59–66. URL: https://eco-science.net/wp-content/uploads/2021/12/9-10.21._topik_Kyrlyk-N.Yu_.59-66.pdf (дата звернення: 15.02.2025).

4. Голіков В. В., Сінюта К. О. Глибоке навчання у контексті штучного інтелекту в морській навігації: перспективи розвитку. *Водний транспорт*. 2024. № 1 (39). С. 104–111. URL: https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.10 (дата звернення: 15.02.2025).

5. Богом'я В., Гудзь А. Штучний інтелект: сучасний стан і перспективи застосування. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. 2023. Т. 46. № 1. С. 13–17. URL: https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-46-1-13-17 (дата звернення: 15.02.2025).

6. Solanki A., Jadiga S. AI applications for improving transportation and logistics operations. *International journal of intelligent systems and applications in engineering*. 2024. Vol. 12. No. 3. P. 2607–2617. URL: https://surl.li/iwbxaa (дата звернення: 15.02.2025).

7. Iyer L. S. AI enabled applications towards intelligent transportation. *Transportation Engineering*. 2021. Vol. 5. Article 100083 URL: https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100083 (дата звернення: 15.02.2025).

8. Bharadiya J. Artificial intelligence in transportation systems a critical review. *American Journal of Computing and Engineering*. 2023. Vol. 6. No. 1. P. 34–45. URL: https://doi.org/10.47672/ajce.1487 (дата звернення: 15.02.2025).

9. Chung S. H. Applications of smart technologies in logistics and transport: A review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Vol. 153. P. 1–30. URL: https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102455 (дата звернення: 15.02.2025).

10. Cugurullo F. Urban artificial intelligence: From automation to autonomy in the smart city. *Frontiers in Sustainable Cities*. 2020. Vol. 2. P. 1–14. URL: https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00038 (дата звернення: 15.02.2025).

11. Копитко В. І., Копитко О. В. Сучасні тенденції розвитку логістики на ринку залізничних перевезень. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2020. № 2(113). С. 55–59. URL: https://doi.org/10.32840/1814-1161/2020-2-9 (дата звернення: 15.02.2025).

12. Berman N. How the U.S. rail system works. *Council on Foreign Relations*. URL: https://www.cfr.org/backgrounder/how-us-rail-system-works (дата звернення: 15.02.2025).

13. Gunnoe C. Railroads ramp up the use of artificial intelligence. *Trains*. URL: https://www.trains.com/trn/news-reviews/news-wire/railroads-ramp-up-the-use-of-artificial-intelligence/ (дата звернення: 15.02.2025).

14. Statista Research Department. Maritime industry in the U.S. *Statista*. URL: https://www.statista.com/topics/10332/maritime-industry-in-the-us/#topicOverview (дата звернення: 16.02.2025).

15. Artificial intelligence in maritime transportation: A comprehensive review of safety and risk management applications / I. Durlik et al. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. No. 18. Article 8420. URL: https://doi.org/10.3390/app14188420 (дата звернення: 15.02.2025).

16. Efficacy of artificial-intelligence-driven differential-diagnosis list on the diagnostic accuracy of physicians: An open-label randomized controlled study / Y. Harada et al. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021. Vol. 18. No. 4. Article 2086. URL: https://doi.org/10.3390/ijerph18042086 (дата звернення: 15.02.2025).

References

1. Yarovyy, V. (2024). Teoretychni zasady tsyfrovizatsiyi konteynernykh perevezen [Theoretical principles of digitalization of container transportation]. *Ekonomika ta suspilstvo*, (66). Retrieved from https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-66-136 [in Ukrainian].

2. Pizhuk, O. I. (2019). Shtuchnyy intelekt yak odyn iz klyuchovykh drayveriv tsyfrovoyi transformatsiyi ekonomiky [Artificial intelligence as one of the key drivers of the digital transformation of the economy]. *Ekonomika, upravlinnya ta administruvannya*, (3(89), 41–46. Retrieved from https://doi.org/10.26642/ema-2019-3(89)-41-46 [in Ukrainian].

3. Kyrlyk, N. Yu. (2021). "Shtuchnyy intelekt" ta yoho vykorystannya v lohistychnykh protsesakh ["Artificiary intelligence" and its use in logistics processes]. *Aktualni problemy ekonomiky*, (243/244), 59–66. Retrieved from https://eco-science.net/wp-content/uploads/2021/12/9-10.21._topik_Kyrlyk-N.Yu_.59-66.pdf [in Ukrainian].

4. Holikov, V. V., & Sinyuta, K. O. (2024). Hlyboke navchannya u konteksti shtuchnoho intelektu v morskiy navihatsiyi: perspektyvy rozvytku [Deep learning in the context of artificial intelligence in maritime navigation: development prospects]. *Vodnyy transport*, (1(39), 104–111. Retrieved from https://doi.org/10.33298/2226-8553.2024.1.39.10 [in Ukrainian].

5. Bohomya, V., & Hudz, A. (2023). Shtuchnyy intelekt: suchasnyy stan i perspektyvy zastosuvannya [Artificial Intelligence: Current Status and Prospects for Application]. *Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi u sferi bezpeky ta oborony, 46*(1), 13–17. Retrieved from https://doi.org/10.33099/2311-7249/2023-46-1-13-17 [in Ukrainian].

6. Solanki, A., & Jadiga, S. (2024). AI applications for improving transportation and logistics operations. *International journal of intelligent systems and applications in engineering, 12*(3), 2607–2617. Retrieved from https://surl.li/iwbxaa

7. Iyer, L. S. (2021). AI enabled applications towards intelligent transportation. *Transportation Engineering, 5*. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.treng.2021.100083

8. Bharadiya, J. (2023). Artificial intelligence in transportation systems a critical review. *American Journal of Computing and Engineering, 6*(1), 34–45. Retrieved from https://doi.org/10.47672/ajce.1487

9. Chung, S. H. (2021). Applications of smart technologies in logistics and transport: A review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 153*, 1–30. Retrieved from https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102455

10. Cugurullo, F. (2020). Urban artificial intelligence: From automation to autonomy in the smart city. *Frontiers in Sustainable Cities, 2*, 1–14. Retrieved from https://doi.org/10.3389/frsc.2020.00038

11. Kopytko, V. I., & Kopytko, O. V. (2020). Suchasni tendentsiyi rozvytku lohistyky na rynku zaliznychnykh perevezen [Current trends in the development of logistics in the railway transportation market]. *Derzhava ta rehiony. Seriya: Ekonomika ta pidpryyemnytstvo*, (2(113), 55–59. Retrieved from https://doi.org/10.32840/1814-1161/2020-2-9 [in Ukrainian].

12. Berman, N. (2023, April 3). *How the U.S. rail system works*. Council on Foreign Relations. Retrieved from https://www.cfr.org/backgrounder/how-us-rail-system-works

13. Gunnoe, C. (2024, December 13). *Railroads ramp up the use of artificial intelligence*. Trains. Retrieved from https://www.trains.com/trn/news-reviews/news-wire/railroads-ramp-up-the-use-of-artificial-intelligence/

14. Statista Research Department. (2023, December 18). *Maritime industry in the U.S.* Statista. Retrieved from https://www.statista.com/topics/10332/maritime-industry-in-the-us/#topicOverview

15. Durlik, I., Miller, T., Kostecka, E., & Tuński, T. (2024). Artificial intelligence in maritime transportation: A comprehensive review of safety and risk management applications. *Applied Sciences, 14*(18), Article 8420. Retrieved from https://doi.org/10.3390/app14188420

16. Harada, Y., Katsukura, S., Kawamura, R., & Shimizu, T. (2021). Efficacy of artificial-intelligence-driven differential-diagnosis list on the diagnostic accuracy of physicians: An open-label randomized controlled study. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 18*(4), Article 2086. Retrieved from https://doi.org/10.3390/ijerph18042086

УДК 621.01:620.91 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.24

Л. А. ПРОЦ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-8162-2108

Ю. І. ФОРДЗЮН
кандидат технічних наук,
доцент кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-6709-9525

Є. М. ЛЮТИЙ
доктор технічних наук,
професор кафедри інженерії, технологій та професійної освіти
Мукачівський державний університет
ORCID: 0000-0001-8349-5560

ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПРОЄКТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МАШИНОБУДІВНИХ СИСТЕМ

У статті проаналізовано сучасні підходи до проєктування машинобудівних систем із врахуванням теплотехнічних процесів. Це зумовлено необхідністю підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу. Актуальність дослідження пояснюється зростанням вартості енергоресурсів, посиленням екологічних стандартів та необхідністю вдосконалення промислових систем для забезпечення їхньої відповідності вимогам сталого розвитку. Установлено, що традиційні підходи до проєктування машинобудівних систем не враховують динамічних умов експлуатації, що спричиняє значні теплові втрати та знижує ефективність роботи обладнання.

Метою дослідження є визначення основних факторів, які впливають на енергетичну ефективність машинобудівних систем, та розробка рекомендацій щодо впровадження інтегрованих теплотехнічних рішень для зниження енергетичних втрат і підвищення продуктивності. У ході дослідження використовувались методи аналізу сучасних підходів до проєктування машинобудівних систем, визначення важливих факторів впливу на енергоефективність, а також експериментальні дослідження із застосуванням типового теплообмінника. Оцінено вплив теплоізоляції трубопроводів і автоматизації насосного обладнання. Теоретичне узагальнення отриманих результатів сприяло формулюванню практичних рекомендацій.

Результати дослідження підтверджують, що застосування теплоізоляції трубопроводів зменшує теплові втрати до 20 %. Водночас упровадження автоматизованих систем управління насосами дає змогу знизити енергоспоживання на 10–15 %. Виявлено, що найвагоміший вплив на енергоефективність мають теплообмінні характеристики матеріалів, геометрія теплообмінників і режими роботи насосного обладнання. Розроблено рекомендації щодо модернізації систем, які включають використання сучасних ізоляційних матеріалів, удосконалення конструкцій теплообмінників та впровадження автоматизації технологічних процесів.

У висновках обґрунтовано доцільність упровадження інтегрованих теплотехнічних рішень для підвищення енергоефективності машинобудівних систем. Перспективами подальших досліджень визначено розробку адаптивних моделей для аналізу теплових процесів у реальному часі, створення нових матеріалів із покращеними теплоізоляційними властивостями та вдосконалення автоматизації управління технологічними процесами. Зазначені напрями сприятимуть підвищенню ефективності машинобудівних систем та забезпеченню їхньої відповідності вимогам сталого розвитку.

Ключові слова: *теплотехнічні процеси, енергоефективність, теплоізоляція, автоматизація, теплообмінники, машинобудівні системи, зменшення теплових втрат.*

L. A. PROTS
PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Engineering,
Technologies and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-8162-2108

YU. I. FORDZJYN
PhD in Engineering,
Associate Professor at the Department of Engineering,
Technologies and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-6709-9525

YE. M. LYUTYI
Doctor of Engineering,
Professor at the Department of Engineering,
Technologies and Professional Education
Mukachevo State University
ORCID: 0000-0001-8349-5560

INTEGRATION OF THERMAL ENGINEERING PROCESSES INTO THE DESIGN OF ENERGY-EFFICIENT MECHANICAL ENGINEERING SYSTEMS

The article analyses modern approaches to the design of mechanical engineering systems about thermal engineering processes. This is due to the need to improve energy efficiency and reduce environmental impact. The rising cost of energy resources explains the study's relevance, the tightening of environmental standards, and the need to improve industrial systems to ensure their compliance with the requirements of sustainable development. It has been established that traditional approaches to designing mechanical engineering systems do not consider dynamic operating conditions, which causes significant heat losses and reduces equipment efficiency.

The study aimsstudy aims to identify the main factors that affect the energy efficiency of mechanical engineering systems and develop recommendations for implementing integrated thermal engineering solutions to reduce energy losses and increase productivity. The study used methods of analysing modern approaches to the design of mechanical engineering systems, identifying important factors affecting energy efficiency, and experimental studies using a typical heat exchanger. The impact of pipeline insulation and automation of pumping equipment was assessed. The theoretical generalisation of the results obtained contributed to formulating practical recommendations.

The study results confirm that pipeline insulation reduces heat losses by up to 20 %. At the same time, the introduction of automated pump control systems can reduce energy consumption by 10–15 %. It was found that heat exchange characteristics of materials, geometry of heat exchangers and operating modes of pumping equipment have the most significant impact on energy efficiency. Recommendations for the modernisation of systems have been developed, including the use of modern insulation materials, improvement of heat exchanger designs and introduction of process automation.

The conclusions substantiate the feasibility of implementing integrated thermal engineering solutions to improve the energy efficiency of machine-building systems. Prospects for further research include the development of adaptive models for analysing thermal processes in real time, the creation of new materials with improved thermal insulation properties, and the improvement of process control automation. These areas will help increase the efficiency of engineering systems and ensure their compliance with the requirements of sustainable development.

Key words: *heat engineering processes, energy efficiency, thermal insulation, automation, heat exchangers, machine-building systems, reduction of heat losses.*

Постановка проблеми

Проєктування енергоефективних машинобудівних систем належить до основних напрямів сучасної інженерної науки, пов'язаних із потребою підвищення ефективності використання енергоресурсів, зменшенням викидів парникових газів та інтеграцією екологічно чистих технологій у промисловість. Особливу увагу в цьому контексті приділено теплотехнічним процесам, які відіграють важливу роль у забезпеченні оптимального енергетичного балансу систем і мінімізації енергетичних втрат. Традиційні підходи до аналізу теплотехнічних процесів часто не враховують комплексного впливу таких факторів, як теплообмін, термодинамічні характеристики матеріалів і режими роботи систем, що знижує ефективність наявних рішень.

Інтеграція теплотехнічних процесів у проєктування машинобудівних систем вимагає міждисциплінарного підходу, який поєднує знання у сфері механіки, енергетики, матеріалознавства та автоматизації. Такий підхід передбачає застосування сучасних методів моделювання, що дають змогу враховувати складні теплові, механічні та динамічні процеси, а також упровадження енергоефективних технологій на різних етапах проєктування. Це сприяє створенню систем, які відповідають сучасним вимогам енергоефективності та можуть адаптуватися до змінних умов експлуатації, що є особливо важливим в умовах глобальних кліматичних змін.

Наукова актуальність зазначеної проблеми зумовлена необхідністю оптимізації енергетичного балансу в промисловості, підвищення ефективності машинобудівних систем і їхньої адаптації до сучасних інноваційних вимог. Практичне значення дослідження полягає у створенні систем, які забезпечать суттєве скорочення

енергоспоживання, зниження витрат на обслуговування та підвищення загальної продуктивності, що є важливим чинником конкурентоспроможності на сучасному ринку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження у сфері інтеграції теплотехнічних процесів у проєктування енергоефективних машинобудівних систем спрямовані на пошук інноваційних рішень для оптимізації енергетичного балансу. Аналіз наукових джерел сприяє визначенню основних підходів та виявленню прогалин, які потребують подальшого вивчення.

В. Волощук досліджує впровадження енергоефективних рішень із застосуванням відновлюваних джерел енергії для теплозабезпечення закладів освіти. Автор зазначає, що такі рішення сприяють зниженню витрат на енергоресурси та зменшенню тепловтрат, що має перспективи для інтеграції в машинобудівні системи [1].

П. Андренко та О. Дмитрієнко акцентують на динамічному синтезі мехатронного модуля руху, що сприяє підвищенню ефективності роботи механізмів. Дослідники доводять, що врахування теплотехнічних характеристик у процесі проєктування оптимізує роботу систем із високими вимогами до тепловіддачі [2].

Ф. Абделауї, А. Джабрі та А. Баркані у своїй праці зосереджуються на оптимізації енергоефективності виробничих процесів. Результати їхніх досліджень підтверджують, що термодинамічний аналіз у високотемпературних умовах дає можливість суттєво знизити енерговитрати на критичних етапах виробництва [3].

С. Чжоу із колегами розробляють інноваційні підходи до оптимізації двигунів Стірлінга, застосовуючи метатеплові концентрації. Експериментальні результати свідчать про підвищення теплової ефективності цих систем, що робить їх перспективними для впровадження у сферу енергоощадного машинобудування [4].

Дослідження термоклінових систем зберігання теплової енергії, проведене під керівництвом Ф. Шварцмайра, було зосереджене на визначенні оптимальних матеріалів і конструкцій. Установлено, що вдосконалення цих параметрів дає змогу мінімізувати деградацію теплових характеристик, що забезпечує підвищену ефективність довготривалих енергоощадних систем [5].

Числове та аналітичне моделювання модуля утилізації теплової енергії вихлопних газів автомобіля за допомогою термоелектричних генераторів стало предметом дослідження М. Вохри, М. Шарми та С. Кумара. Їхні результати демонструють значне покращення ефективності використання теплових ресурсів у промислових процесах завдяки впровадженню таких технологій [6].

Використання нанорідин у системах чистої енергії та енергоефективності досліджували С. Салехін, М. Ехсан, С. Файсал і А. Ислам. Результати їхньої роботи свідчать про те, що нанорідини здатні значно покращити теплопередачу та скоротити енергоспоживання, що робить їх перспективними для впровадження в енергоефективні машинобудівні системи [7].

С. К. Саха, Ю. Т. Гу та М. М. К. Хан дослідили підходи до оптимізації теплопередачі в конструкціях із перегородками. У ході роботи виявлено, що зміни в геометрії та застосування інноваційних матеріалів забезпечують зниження теплових втрат і підвищують ефективність теплотехнічних систем [8].

У дослідженні К.-Х. Гроте та Г. Хефазі розглянуто перспективи використання адаптивних матеріалів у теплотехнічних системах. Автори довели, що інтеграція цих матеріалів сприяє збільшенню енергоощадження й оптимізації продуктивності механізмів [9].

Дослідження, проведене Г. Брамердорфером та його співавторами, було присвячене вивченню сучасних технік оптимізації для проєктування електричних машин. Установлено, що впровадження новітніх методів розрахунку теплових параметрів зменшує втрати тепла до 25 %, сприяючи підвищенню загальної ефективності систем [10].

А. Домоде зосередив свою увагу на впровадженні автоматизації в механічні системи. Результати його роботи показали значне скорочення енерговитрат завдяки використанню автоматизованих рішень для управління теплотехнічними параметрами [11].

Б. Талебджаді у своїй роботі продемонстрував переваги застосування методів машинного навчання для моделювання теплових процесів. Виявлено, що такі підходи забезпечують точнішу оптимізацію параметрів і значно підвищують ефективність роботи теплотехнічних систем [12].

К. Ба та Б. Файсаль дослідили інноваційні підходи до конвекційного нагрівання, зосереджуючи увагу на зниженні енергоспоживання та мінімізації теплових втрат завдяки сучасним матеріалам. Вони встановили, що ці методи забезпечують ефективніше використання енергії у виробничих процесах [13].

Інший підхід до розв'язання проблем енергоефективності продемонстровано в дослідженнях І. Дінсера та М. Розена. Їхня робота акцентує на інтеграції теплотехнічних рішень, які не лише оптимізують енергетичні системи, але й сприяють зменшенню екологічного впливу промисловості [14].

У дослідженні Е. Шова особливий акцент зроблено на соціальному аспекті енергоефективності. Автор наголошує, що раціональне використання енергетичних ресурсів є визначальним чинником для забезпечення стабільності та сталого розвитку машинобудівних систем [15].

Аналіз наукових праць підтверджує, що інтеграція теплотехнічних процесів у проєктування машинобудівних систем забезпечує оптимізацію витрат енергії, підвищення ефективності роботи систем і мінімізацію впливу на довкілля. Це створює нові можливості для розробки інноваційних підходів у машинобудуванні.

У сучасних дослідженнях із проєктування машинобудівних систем залишаються недостатньо вивченими аспекти інтеграції теплотехнічних процесів, зокрема, вплив термодинамічних характеристик матеріалів і конструкцій на енергоефективність систем. Відсутні спрощені теплотехнічні моделі, які могли б ефективно оцінювати енергетичні втрати в умовах змінних режимів роботи. Вплив теплоізоляції та автоматизації насосного обладнання також вивчено недостатньо, особливо щодо їхнього оптимального поєднання для досягнення енергетичного балансу.

Крім того, відсутні універсальні рекомендації для впровадження комплексних рішень у виробничу практику, які б враховували взаємодію теплообміну, теплоізоляції та автоматизації. Ці прогалини обмежують можливості ефективної модернізації промислових систем і їхньої адаптації до сучасних екологічних та енергетичних вимог.

Запропоноване дослідження спрямоване на заповнення цих прогалин шляхом експериментального аналізу типових теплообмінників, оцінки впливу важливих рішень на енергоефективність і розробки практичних рекомендацій. Результати сприятимуть розширенню розуміння теплотехнічних процесів і вдосконаленню підходів до проєктування енергоефективних машинобудівних систем.

Формулювання мети дослідження

Мета статті полягає у вивченні можливостей інтеграції теплотехнічних процесів у проєктування енергоефективних машинобудівних систем. Це передбачає забезпечення оптимального енергетичного балансу, мінімізацію енергетичних втрат та підвищення загальної ефективності промислових об'єктів.

Завдання статті:

1. Проаналізувати сучасні підходи до проєктування машинобудівних систем з урахуванням теплотехнічних процесів та визначити основні фактори, що впливають на їхню енергетичну ефективність, включаючи термодинамічні та теплообмінні характеристики.
2. Дослідити вплив теплоізоляції, автоматизації та можливості застосування простих теплотехнічних моделей для оцінки енергетичних втрат у машинобудівних системах.
3. Розробити рекомендації щодо впровадження інтегрованих теплотехнічних рішень у виробничу практику для підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу.

Викладеннч основного матеріалу дослідження

Сучасні підходи до проєктування машинобудівних систем із врахуванням теплотехнічних процесів спрямовані на забезпечення енергоефективності, зменшення енергетичних втрат та оптимізацію роботи систем в умовах підвищених вимог до екологічної сталості. Основними принципами такого проєктування є використання сучасних технологій моделювання теплових процесів, упровадження матеріалів із високими теплоізоляційними властивостями та адаптація систем до змінних умов експлуатації [9]. Традиційні підходи, що базуються на статичних моделях, поступаються місцем динамічним, які враховують комплексні процеси теплообміну, термодинаміки та аеродинаміки. У цьому контексті важливим є розроблення інтегрованих рішень, які поєднують теплотехнічні процеси з автоматизованими системами управління.

Таблиця 1

Сучасні підходи до проєктування машинобудівних систем з урахуванням теплотехнічних процесів: характеристика та практичне застосування

Підхід	Основні характеристики	Практичне застосування
Традиційний підхід	Використання статичних моделей теплообміну, розрахунок за спрощеними формулами	Переважно застосовується в простих системах із невисокими вимогами до енергоефективності
Динамічний підхід	Застосування комп'ютерного моделювання теплових процесів у реальному часі	Використовується для складних систем, які працюють у змінних умовах
Інтегрований підхід	Поєднання теплотехнічного аналізу з автоматизованими системами управління та контролю	Ефективний у високотехнологічних системах, орієнтованих на енергоефективність

Джерело: сформовано авторами на підставі [2, 6, 7].

На практиці сьогодні традиційний підхід все рідше використовується через його обмежену ефективність і неможливість урахувати складні теплотехнічні процеси, характерні для сучасних машинобудівних систем. Динамічний підхід забезпечує високу точність і дає можливість моделювати роботу систем у режимі реального часу, що значно підвищує їхню адаптивність до змінних умов експлуатації [11]. Наприклад, у промислових котлах або турбокомпресорах використовуються системи, які постійно моніторять теплообмін і коригують параметри роботи для забезпечення оптимального використання енергії. Інтегрований підхід є ще одним важливим кроком у проєктуванні, оскільки він дає змогу об'єднати теплотехнічний аналіз із системами автоматичного управління, що значно знижує втрати тепла та забезпечує безперервний моніторинг основних параметрів. Це особливо важливо для промислових підприємств, які прагнуть зменшити екологічний вплив своєї діяльності, упроваджуючи екологічно чисті технології. Зміни в підходах до проєктування зумовлені підвищенням вимог до енергоефективності та стрімким розвитком технологій, що відкривають нові можливості для оптимізації теплотехнічних процесів у сучасних умовах.

Енергетична ефективність машинобудівних систем залежить від низки факторів, серед яких важливу роль відіграють термодинамічні та теплообмінні характеристики. Термодинамічні властивості матеріалів визначають їхню здатність до збереження та передачі теплової енергії, а ефективність теплообмінних процесів впливає на швидкість і якість передачі енергії між різними частинами системи. Основними аспектами, які впливають на енергетичну ефективність, є коефіцієнт теплопровідності матеріалів, теплоємність, а також умови теплообміну, такі як температура, швидкість руху робочого середовища та геометрія поверхонь теплообміну. У сучасних умовах забезпечення оптимальних характеристик цих факторів є основою для підвищення енергоефективності систем, зниження енергетичних втрат та підвищення продуктивності (табл. 2).

Таблиця 2

Фактори, що впливають на енергетичну ефективність машинобудівних систем

Фактор	Характеристика	Приклади застосування
Теплопровідність матеріалів	Визначає здатність матеріалів передавати теплову енергію	Використання високотеплопровідних сплавів у теплообмінниках
Теплоємність	Визначає здатність матеріалів зберігати теплову енергію	Використання матеріалів із високою теплоємністю в акумуляторах тепла
Умови теплообміну	Залежність ефективності від температури, швидкості середовища та площі контакту	Оптимізація конструкцій турбін для мінімізації теплових втрат
Геометрія поверхонь теплообміну	Впливає на швидкість та ефективність передачі тепла	Використання оребрених поверхонь у радіаторах систем охолодження

Джерело: сформовано автором на підставі [3, 5, 8, 10].

Наприклад, у системах охолодження автомобільних двигунів використовуються теплообмінники зі спеціальною геометрією оребрених поверхонь, що підвищує площу теплообміну та забезпечує ефективне охолодження двигуна. У промислових теплообмінниках для хімічної галузі застосовують матеріали з високою теплопровідністю, які зменшують енергетичні втрати та забезпечують рівномірний розподіл тепла. Акумулятори тепла в системах відновлюваної енергетики виготовляються з матеріалів високої теплоємності, що сприяє збереженню енергії впродовж тривалого часу. Сучасні технології дають можливість також враховувати вплив динамічних умов теплообміну, таких як зміна температури або швидкості руху середовища, що оптимізує роботу систем у реальному часі. Завдяки цьому машинобудівні системи стають більш енергоефективними, екологічно сталими та конкурентоспроможними в умовах сучасної промисловості.

Оцінка енергетичних втрат у машинобудівних системах є важливим етапом оптимізації їхньої роботи, що дає змогу зменшити енергоспоживання та підвищити загальну ефективність. Простота та доступність теплотехнічних моделей роблять їх корисними для початкових етапів аналізу теплових процесів у різних системах, таких як двигуни, теплообмінники чи системи охолодження [12]. Такі моделі базуються на фундаментальних законах термодинаміки та теплообміну, даючи можливість швидко оцінити основні енергетичні параметри: температурний перепад, коефіцієнти теплопередачі та геометричні характеристики систем – без необхідності використання складних комп'ютерних симуляцій. У сучасних умовах прості моделі залишаються актуальними для практичного застосування завдяки їхній ефективності, низькій вартості реалізації та можливості швидкого отримання результатів (табл. 3).

Таблиця 3

Типи простих теплотехнічних моделей для оцінки енергетичних втрат: параметри та практичне застосування

Тип моделі	Основні параметри	Практичне застосування
Балансові моделі	Розрахунок теплових втрат на основі енергетичного балансу	Оцінка втрат тепла в промислових теплообмінниках
Емпіричні моделі	Використання експериментальних залежностей для аналізу	Визначення ефективності роботи автомобільних радіаторів
Спрощені числові моделі	Використання числових методів для розв'язання рівнянь теплопередачі	Розрахунок втрат тепла в системах вентиляції та кондиціонування

Джерело: сформовано авторами на підставі [1, 3, 12].

Балансові моделі часто застосовуються для швидкої оцінки теплових втрат у промислових системах, таких як котли чи теплообмінники. Наприклад, у хімічній промисловості вони допомагають визначити, яку частку енергії втрачають при нагріванні робочого середовища, та оптимізувати процеси шляхом ізоляції чи модернізації обладнання. Емпіричні моделі використовуються в автомобільній промисловості для визначення ефективності роботи радіаторів та систем охолодження, забезпечуючи підвищення надійності роботи двигуна. Спрощені числові моделі актуальні для аналізу вентиляційних систем у будівлях, що дає можливість знизити втрати тепла через стіни чи вікна за допомогою оптимізації конструкцій. У сучасних умовах ці моделі є основою для первинної оцінки енергетичних характеристик систем, слугуючи базою для подальшого вдосконалення та впровадження складніших методів моделювання [15].

З метою визначення впливу теплоізоляції трубопроводів та автоматизації насосного обладнання на енергоефективність системи було проведено експеримент із використанням типового пластинчастого теплообмінника. Теплообмінник мав номінальну площу теплообміну 0,5 м^2 і був частиною системи охолодження, що працювала в умовах постійного теплового навантаження потужністю 50 кВт. Система включала трубопроводи з водяним теплоносієм та насос із регульованою швидкістю потоку.

Експеримент проводився в три етапи: на першому система працювала в базовому режимі без змін; на другому етапі трубопроводи було ізольовано матеріалами із теплопровідністю 0,04 Вт/мК; на третьому було впроваджено автоматизоване управління насосом, яке адаптувало швидкість потоку до температури теплоносія. Упродовж кожного етапу фіксувалися температура вихідного теплоносія, енергоспоживання насоса та втрати тепла через трубопроводи. Тривалість кожного етапу становила 60 хвилин, що забезпечувало стабільність умов вимірювання (табл. 4).

Таблиця 4

Результати експерименту з визначення впливу теплоізоляції та автоматизації на енергоефективність типового теплообмінника

Етап експерименту	Температура на виході (°C)	Енергоспоживання насоса (Вт год)	Втрати тепла (%)	Продуктивність насоса (л/хв)
Базовий режим	45	600	30	40
Додаткова теплоізоляція	50	580	20	40
Автоматизоване управління насосом	50	540	20	35

Джерело: власна розробка авторів

Результати експерименту показали, що в базовому режимі система характеризувалася значними втратами тепла через неізольовані трубопроводи, що сягали 30 %, а температура вихідного теплоносія становила 45 °C. Додавання теплоізоляції сприяло зменшенню втрати тепла до 20 % і підвищенню температури теплоносія на виході до 50 °C, при цьому енергоспоживання насоса залишилося майже незмінним. Упровадження автоматизованого управління насосом забезпечило додаткове зниження енергоспоживання на 40 Вт за год завдяки оптимізації швидкості потоку, зберігаючи температуру вихідного теплоносія на рівні 50 °C.

Експеримент підтвердив, що навіть прості заходи, такі як теплоізоляція трубопроводів і автоматизація насосного обладнання, здатні значно знизити теплові втрати та підвищити загальну енергоефективність машинобудівних систем. Це свідчить про доцільність їхнього впровадження як економічно ефективного рішення для модернізації наявних промислових установок.

Для підвищення енергоефективності машинобудівних систем необхідно першочергово впровадити заходи з теплоізоляції трубопроводів, які забезпечать мінімізацію втрат тепла в системах із високотемпературними робочими середовищами. Використання матеріалів із низькою теплопровідністю дасть можливість стабілізувати робочі параметри системи та знизити енергоспоживання. Наступним етапом є вдосконалення конструкцій теплообмінників, яке включає збільшення площі теплопередачі або оптимізацію геометрії оребрених поверхонь, що підвищує ефективність передачі тепла без потреби в значних технічних змінах.

Інтеграція автоматизованих систем управління насосами є наступним важливим рішенням, яке забезпечує адаптацію швидкості потоку до змінних умов експлуатації. Це сприяє зменшенню енергоспоживання насосного обладнання, одночасно підтримуючи необхідні параметри температури та потоку теплоносія [14]. В умовах змінного теплового навантаження такі системи дають змогу досягти високої стабільності роботи без зайвих витрат.

Окрім технічних заходів, важливим є забезпечення регулярного моніторингу роботи систем із використанням датчиків теплових втрат і витрат енергії. Це сприяє оперативному виявленню недоліків та впровадженню необхідних коригувальних заходів для підтримання ефективності. Додатково варто розглянути можливість використання вторинного тепла для опалення чи технологічних потреб, що сприяє зменшенню загального енергоспоживання та екологічного впливу.

Підвищення енергоефективності неможливе без залучення персоналу. Регулярне навчання співробітників правильній експлуатації та обслуговуванню сучасного обладнання є важливим фактором забезпечення довгострокового ефекту від упроваджених рішень. Лише комплексний підхід, що включає технічні, організаційні та освітні заходи, забезпечить сталі результати та сприятиме досягненню цілей у сфері енергоефективності та екологічної відповідальності.

Висновки

Інтеграція теплотехнічних процесів у проєктування машинобудівних систем є визначальним чинником для забезпечення їхньої енергоефективності та зменшення енергетичних втрат. Використання сучасних моделей аналізу теплових процесів, застосування матеріалів із високими теплоізоляційними властивостями та впровадження автоматизованих систем управління сприяють значному скороченню енергоспоживання та підвищенню

продуктивності. Практичні рекомендації щодо впровадження інноваційних теплоізоляційних матеріалів, модернізації конструкцій теплообмінників і автоматизації насосного обладнання дають змогу досягти оптимального балансу між інвестиціями в модернізацію та ефективністю роботи систем.

Дослідження виявило основні проблеми, які ускладнюють підвищення енергоефективності машинобудівних систем. Традиційні підходи до аналізу теплотехнічних процесів часто не враховують динамічних умов експлуатації, а відсутність інтегрованих рішень, що поєднують теплові процеси із системами автоматизації, створює суттєві перешкоди для їхньої адаптації до сучасних вимог.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на розроблення адаптивних моделей, які враховують змінні умови роботи систем у реальному часі, створення інноваційних теплоізоляційних матеріалів із покращеними характеристиками енергоефективності, а також удосконалення технологій автоматизації. Акцент на цих напрямах забезпечить розвиток машинобудівних систем, що відповідатимуть сучасним стандартам сталого розвитку й екологічної безпеки, одночасно демонструючи високу ефективність у змінних умовах експлуатації.

Список використаної літератури

1. Волощук В. А. Впровадження енергоефективних рішень із використанням місцевих та відновлювальних джерел енергії при теплозабезпеченні навчальних закладів в умовах України. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».* 2015. № 15. С. 156–165. URL: https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9a764dee-81a1-44f8-9751-5c6c09a1ec0b (дата звернення: 21.12.2024).

2. Андренко П. М., Дмитрієнко О. В. Динамічний синтез мехатронного модуля руху. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2014. Вип. 12. № 1055. С. 157–163. URL: https://core.ac.uk/download/pdf/50577304.pdf (дата звернення: 21.12.2024).

3. Abdelaoui F. Z. E., Jabri A., Barkany A. E. Optimization techniques for energy efficiency in machining processes – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023. Vol. 125. P. 2967–3001. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y (date of access: 21.12.2024).

4. Zhou X., Xu X., Ouyang X., Huang J. Convective meta-thermal concentration for ultrahigh efficient Stirling engine with waste heat and cold utilization. *arXiv preprint*. arXiv:2306.07813. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2306.07813 (date of access: 21.12.2024).

5. Schwarzmayr P., Birkelbach F., Walter H., Hofmann R. Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *arXiv preprint*. arXiv:2301.01071. 2023. URL: https://arxiv.org/abs/2301.01071 (date of access: 21.12.2024).

6. Vohra, M., Sharma, M., Kumar, S. Numerical and Analytical Investigation of Automotive Exhaust Gas Waste Heat Recovery Module Using Thermoelectric Generator. In: Kumar, R., Pandey, A. K., Sharma, R. K., Norkey, G. (Eds.). *Recent Trends in Thermal Engineering*. Singapore: Springer, 2022. P. 23–31. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3132-0_3 (date of access: 21.12.2024).

7. Salehin, S., Ehsan, M. M., Faysal, S. R., Islam, A. K. M. S. Utilization of Nanofluid in Various Clean Energy and Energy Efficiency Applications. In: Chowdhury, A. A., Hassan, N. M. (Eds.). *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems*. Singapore: Springer, 2018. P. 3–33. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_2 (date of access: 21.12.2024).

8. Saha, S. C., Gu, Y. T., Khan, M. M. K. Heat Transfer Enhancement in a Baffled Attic-Shaped Space. In: Khan, M. M. K., Chowdhury, A. A., Hassan, N. M. S. (Eds.). *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems: Key Issues and Recent Developments for a Sustainable Future*. Singapore: Springer, 2017. P. 157–172. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_8 (date of access: 21.12.2024).

9. Grote K.-H., Hefazi H. *Springer handbook of mechanical engineering*. Springer Nature. 2021. P. 5–30. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=upQoEAAAQBAJ (date of access: 21.12.2024).

10. Bramerdorfer G., Tapia J. A., Pyrhönen J. J., Cavagnino A. Modern Electrical Machine Design Optimization: Techniques, Trends, and Best Practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. Vol. 65, no. 10. P. 7672–7684. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801805 (date of access: 21.12.2024).

11. Atomode D. Optimizing energy efficiency in mechanical systems: Innovations and applications. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*. 2023. Vol. 11, no. 5. P. 458–464. URL: https://www.jetir.org/papers/JETIR2405G63.pdf (date of access: 21.12.2024).

12. Talebjadi B., et al. Energy simulation and variable analysis of refining process in thermo-mechanical pulp mill using machine learning approach. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems*. 2021. Vol. 27, no. 1. P. 562–585. DOI: https://doi.org/10.1080/13873954.2021.1990967 (date of access: 21.12.2024).

13. Ba K., Fayçal B. N. Improved Energy Efficiency of Mixed Convection Heating Process in Eccentric Annulus. *Advances in Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 13, no. 8. DOI: https://doi.org/10.1177/16878140211039150 (date of access: 21.12.2024).

14. Dincer I., Rosen M.A., Ahmadi P. Optimization of energy systems. John Wiley & Sons. 2017. P. 13–25. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=UD_CDgAAQBAJ (date of access: 21.12.2024).

15. Shove E. What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information*. 2017. Vol. 46, no. 7. P. 779–789. DOI: https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1361746 (date of access: 21.12.2024).

References

1. Voloshchuk, V.A. (2015). Vprovadzhennia enerhoefektyvnykh rishen iz vykorystanniam mistsevykh ta vidnovliuvalnykh dzherel enerhii pry teplozabezpechenni navchalnykh zakladiv v umovakh Ukrainy [Implementation of energy-efficient solutions using local and renewable energy sources in the heat supply of educational institutions in Ukraine]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskyi politekhnichnyi instytut" – Bulletin of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute," 15*, 156–165. Retrieved from https://repository.kpi.kharkov.ua/items/9a764dee-81a1-44f8-9751-5c6c09a1ec0b [in Ukrainian]

2. Andrenko, P.M., & Dmytriienko, O.V. (2014). Dynamichnyi syntez mechatronnoho moduulia rukhu [Dynamic synthesis of a mechatronic motion module]. *Visnyk NTU "KhPI". Seriia: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia – Bulletin of NTU "KhPI". Series: Energy and Heat Engineering Processes and Equipment, 12*(1055), 157–163. Retrieved from https://core.ac.uk/download/pdf/50577304.pdf [in Ukrainian].

3. Abdelaoui, F.Z.E., Jabri, A., & Barkany, A.E. (2023). Optimization techniques for energy efficiency in machining processes – a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 125*, 2967–3001. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-023-10927-y

4. Zhou, X., Xu, X., Ouyang, X., & Huang, J. (2023). Convective meta-thermal concentration for ultrahigh efficient Stirling engine with waste heat and cold utilization. *arXiv preprint*. arXiv:2306.07813. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2306.07813

5. Schwarzmayr, P., Birkelbach, F., Walter, H., & Hofmann, R. (2023). Standby efficiency and thermocline degradation of a packed bed thermal energy storage: An experimental study. *arXiv preprint*. arXiv:2301.01071. Retrieved from https://arxiv.org/abs/2301.01071

6. Vohra, M., Sharma, M., & Kumar, S. (2022). Numerical and analytical investigation of automotive exhaust gas waste heat recovery module using thermoelectric generator. In Kumar, R., Pandey, A.K., Sharma, R.K., & Norkey, G. (Eds.), *Recent Trends in Thermal Engineering* (pp. 23–31). Springer Singapore. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-16-3132-0_3

7. Salehin, S., Ehsan, M.M., Faysal, S.R., & Islam, A.K.M.S. (2018). Utilization of nanofluid in various clean energy and energy efficiency applications. In Chowdhury, A.A., & Hassan, N.M. (Eds.), *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems* (pp. 3–33). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_2

8. Saha, S.C., Gu, Y.T., & Khan, M.M.K. (2017). Heat transfer enhancement in a baffled attic-shaped space. In Khan, M.M.K., Chowdhury, A.A., & Hassan, N.M.S. (Eds.), *Application of Thermo-fluid Processes in Energy Systems: Key Issues and Recent Developments for a Sustainable Future* (pp. 157–172). Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-10-0697-5_8

9. Grote, K.-H., & Hefazi, H. (2021). *Springer handbook of mechanical engineering*. Springer Nature. Retrieved from https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=upQoEAAAQBAJ

10. Bramerdorfer, G., Tapia, J.A., Pyrhönen, J.J., & Cavagnino, A. (2018). Modern electrical machine design optimization: Techniques, trends, and best practices. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65*(10), 7672–7684. DOI: https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2801805

11. Atomode, D. (2023). Optimizing energy efficiency in mechanical systems: Innovations and applications. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research, 11*(5), 458–464. Retrieved from https://www.jetir.org/papers/JETIR2405G63.pdf

12. Talebjadi, B., et al. (2021). Energy simulation and variable analysis of refining process in thermo-mechanical pulp mill using machine learning approach. *Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems, 27*(1), 562–585. DOI: https://doi.org/10.1080/13873954.2021.1990967

13. Ba, K., & Fayçal, B.N. (2021). Improved energy efficiency of mixed convection heating process in eccentric annulus. *Advances in Mechanical Engineering, 13*(8). DOI: https://doi.org/10.1177/16878140211039150

14. Dincer, I., Rosen, M.A., & Ahmadi, P. (2017). *Optimization of energy systems*. John Wiley & Sons. Retrieved from https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=UD_CDgAAQBAJ.

15. Shove, E. (2017). What is wrong with energy efficiency? *Building Research & Information, 46*(7), 779–789. DOI: https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1361746

UDC 621.878.23-182.38 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.25

V. P. RASHKIVSKYI
Ph.D., Associate Professor at the Department of Construction Machinery
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0002-5369-6676

M. O. PRYSTAILO
Ph.D., Associate Professor at the Department of Construction Machinery
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-3151-4680

B. M. FEDYSHYN
Postgraduate Student, Assistant at the Department of Construction Machinery
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0000-0003-2420-7332

A. S. BESIDA
Postgraduate student at the Department of Construction Machinery
Kyiv National University of Construction and Architecture
ORCID: 0009-0009-6826-8883

DEVELOPMENT OF A PHYSICAL MODEL AND DETERMINATION OF SIMILARITY COEFFICIENTS OF A SPATIALLY ORIENTED KNIFE OF A BULLDOZER BLADE

This paper considers the creation of a physical model of an equipment for cutting soils with a spatially oriented knife of a bulldozer blade for experimental studies. In order to study the process of interaction between the working body and the working environment, it is necessary to conduct experimental studies, for which, as a rule, natural objects of research or their models are used. Physical modelling preserves the physical nature of the phenomena, but changes their scale. Using the similarity theory and physical modelling, the conditions of similarity of the equipment for cutting soils with a spatially oriented knife of a bulldozer blade are determined, in which the interaction of the working body and the working environment is described by a power equation taking into account their parameters. In this case, the parameters of the natural process of interaction between the working body and the working environment are written through the parameters of the physical model and similarity coefficients. As a result of dividing the corresponding terms of the force equations of the natural equipment and the model by each other, a system of two equations was obtained that links six unknown values of the similarity coefficients. The obtained values of the similarity coefficients made it possible to build a physical model of the installation for cutting soil with a spatially oriented knife of a bulldozer blade, which is similar to the natural installation for cutting soil with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. As a physical model of the equipment, taking into account the similarity coefficients and the envisaged research tasks, the dynamometric stand for registering the force load of the author's design of KNUBA was modified to study the process of cutting soils with a spatially oriented knife of a bulldozer blade, which allows for full-fledged experimental studies, taking into account all the existing factors of interaction between the working medium and the working body during cutting. It is proposed to use paraffin wax as a working environment and a steel model of a spatially oriented knife as a working body.

Key words: *installation, physical model, cutting, working body, environment, modelling, similarity coefficients.*

В. П. РАШКІВСЬКИЙ
кандатат технічних наук,
доцент кафедри будівельних машин
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0002-5369-6676

М. О. ПРИСТАЙЛО
кандатат технічних наук,
доцент кафедри будівельних машин
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0003-3151-4680

Б. М. ФЕДИШИН
аспірант, асистент кафедри будівельних машин
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0000-0003-2420-7332

А. С. БЕСІДА
аспірант кафедри будівельних машин
Київський національний університет будівництва і архітектури
ORCID: 0009-0009-6826-8883

ПОБУДОВА ФІЗИЧНОЇ МОДЕЛІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОДІБНОСТІ ПРОСТОРОВО ОРІЄНТОВАНОГО НОЖА ВІДВАЛУ БУЛЬДОЗЕРА

У даній роботі розглянуто створення фізичної моделі установки для різання ґрунтів просторово орієнтованим ножем відвалу бульдозера, для проведення експериментальних досліджень. З метою дослідження процесу взаємодії робочого органу з робочим середовищем виникає необхідність проведення експериментальних досліджень, для яких, як правило, використовуються натурні об'єкти дослідження або їх моделі. При фізичному моделюванні зберігається фізична природа явищ, але змінюється їх масштаб. Використовуючи теорему подібності та фізичне моделювання, визначено умови подібності установки для різання ґрунтів просторово орієнтованим ножем відвалу бульдозера, в якій взаємодія робочого органу та робочого середовища описується силовим рівнянням із врахуванням їх параметрів. При цьому параметри натурального процесу взаємодії робочого органу та робочого середовища записано через параметри фізичної моделі та коефіцієнти подібності. В результаті ділення відповідних доданків силових рівнянь натурної установки та моделі між собою отримано систему з двох рівнянь, яка зв'язує між собою шість невідомих величин коефіцієнтів подібності. Отримані значення коефіцієнтів подібності дали можливість побудувати фізичну модель установки для різання ґрунтів просторово орієнтованим ножем відвалу бульдозера, що подібна натурній установці для різання ґрунтів просторово орієнтованим ножем відвалу бульдозера. В якості фізичної моделі установки з врахуванням коефіцієнтів подібності та передбачених задач досліджень було доопрацьовано динамометричний стенд реєстрації силового навантаження авторської конструкції КНУБА для дослідження процесу різання ґрунтів просторово орієнтованим ножем відвалу бульдозера, що дозволяє провести повноцінні експериментальні дослідження з врахуванням всіх чинних факторів взаємодії робочого середовища та робочого органу під час різання. В якості робочого середовища запропоновано використання парафін, а в якості робочого органу – стальну модель просторово орієнтованого ножа.

Ключові слова: *установка, фізична модель, різання, робочий орган, середовище, моделювання, коефіцієнти подібності.*

Formulation of the problem

For experimental research, as a rule, full-scale research objects and their models are used [1]. In a full-scale experiment, the means of experimental research interact directly with the object of research, and in a model experiment – with its modelled prototype.

When conducting model experimental research, the model acts as a means of experimental research and a direct object of research [2–4].

Analysis of general research and publications

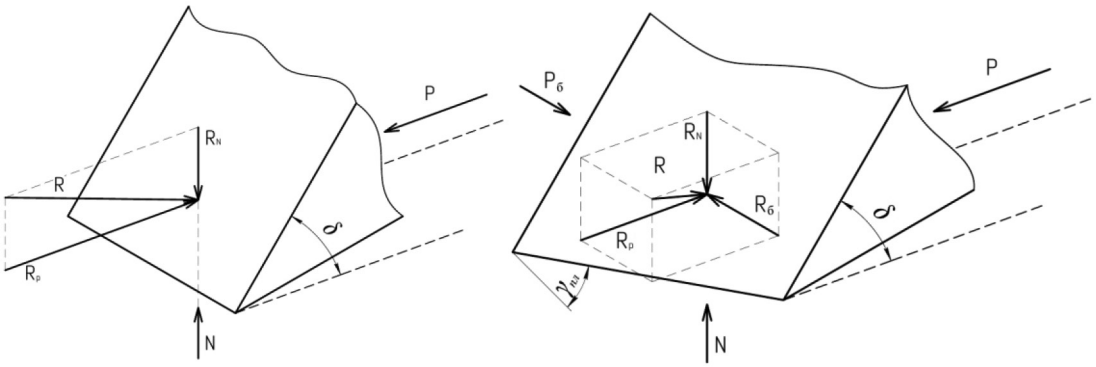
Nowadays, the creation of a real working body for experimental research would require a significant amount of time and money. Given this, the task is to create a physical model of this working body and conduct full-fledged experimental studies on it.

As the criteria of similarity for the construction of a physical model (Fig. 1), dimensionless complexes are used, which are the ratio of the corresponding components of the differential equations of the real object and the model.

The methodology for modelling the working processes of soil destruction is based on the theory of similarity.

The conditions for physical modelling of the working process of soil destruction stipulate that: the defining criteria for the similarity of the soil destruction process for the model and the original should be the same; the physical parameters of the system of differential equations describing the working process compiled for the model and the original should be proportional; the process of interaction of the working tool with the environment in the model and the original should belong to the same class of phenomena and be described by the same system of differential equations; the model and the original of the working tool and the system.

The working hypothesis is based on the fact that the combination of the positive effects of reducing the energy intensity of destruction by a spatially oriented knife cutting will allow for an overall reduction in the energy intensity of soil destruction by a blade. in our opinion, this should ensure the cutting of the soil and its easy removal from the development zone. Thus, reducing the resistance that occurs during the operation of the bulldozer and increasing its productivity, as well as expanding the scope of use.



a *b*

Fig. 1. Interaction of the bulldozer blade with the working environment during *a*) rectangular cutting, *b*) oblique cutting (spatially oriented)

After applying the vector of the direction of the cutting force with a spatially oriented knife and determining the plan of movement, it becomes clear that there will be a change in the geometric interaction of the spatially oriented knife with the workpiece, which leads to a change in cutting forces and a change in resistances that depend on the geometric parameters of the knife [5, 6].

Cutting force:

$$P = P_f + P_s + P_{s.c}. \tag{1}$$

Full cutting force for rectangular cutting:

$$P = \varphi m_f bh + 2m_s h^2 + 2m_{s.c} h. \tag{2}$$

The interaction between the spatially oriented knife and the working environment is described by the equation:

$$P = \varphi(\delta)\phi_f m_f bh + \phi_s m_s h^2 + \phi_{s.c} m_{s.c} h. \tag{3}$$

Where b, h – knife width and cutting depth (thickness); m_f – strength coefficient characterising the specific resistances in the frontal part of the cut; m_s – strength coefficient characterising the specific resistances in the lateral extensions; $m_{s.c}$ – strength coefficient characterising the specific resistances along the lateral cut lines; φ (δ) – coefficient that takes into account the effect of the cutting angle δ (at δ = 45° φ = 1); φ_f – is a coefficient that takes into account the effect of the angle γ_{pl} of the knife's rotation in the plan view, respectively, of the force P_f; φ_s – is a coefficient that takes into account the effect of the angle γ_{pl} of the knife's rotation in the plan view, respectively, of the force P_s; $\varphi_{s.c}$ – is a coefficient that takes into account the effect of the angle γ_{pl} of the knife's rotation in the plan view, respectively, of the force $P_{s.c}$.

Formation of the research aim

The aim of this study is to determine the similarity coefficients for building a physical model of a spatially oriented knife of the bulldozer blade.

Presentation of the main research material

To comply with the conditions of similarity of the processes occurring in the interaction with the environment of the physical model of the original working body, it is necessary to observe the equality of geometric and dynamic similarity criteria. Let's write the parameters of the natural process through the parameters of the physical model and similarity coefficients

$$P_N = \nu_P \cdot P_M, \quad m_{f.N} = \nu_m \cdot m_{f.M}, \quad m_{s.N} = \nu_{m_s} \cdot m_{s.M}, \quad m_{s.c.N} = \nu_{m_{s.c.}} \cdot m_{s.c.M}, \quad b_N = \nu_b \cdot b_M, \quad h_N = \nu_h \cdot h_M, \tag{4}$$

Where P_N, $m_{f.N}$, $m_{s.N}$, $m_{s.c.N}$, b_N, h_N– parameters of the natural model; P_M, $m_{f.M}$, $m_{s.M}$, $m_{s.c.M}$, b_M, h_M – parameters of the physical model, ν_P, ν_m, ν_{m_s}, $\nu_{m_{s.c}}$, ν_b, ν_h – relevant similarity coefficients.

Then we can write equations similar to equation (3) for the natural process and its model, which have the form:

$$P_N = \varphi(\delta)\varphi_f m_{f.N} b_N h_N + \varphi_s m_{s.N} h_N^2 + \varphi_{s.c} m_{s.c.N} h_N; \tag{5}$$

$$P_M = \varphi(\delta)\varphi_f m_{f_M} b_M h_M + \varphi_s m_{s_M} h_M^2 + \phi_{s.c} m_{s.c_M} h_M. \tag{6}$$

Based on the similarity of the model and the natural process, we divide the corresponding terms of equations (5) and (6) among themselves and write the following relations:

$$\frac{P_N}{P_M} = \frac{\varphi(\delta)\varphi_f m_{f.N} b_N h_N}{\varphi(\delta)\varphi_f m_{f.M} b_M h_M} = \frac{\varphi_s m_{s.N} h_N^2}{\varphi_s m_{s.M} h_M^2} = \frac{\varphi_{s.c} m_{s.c.N} h_N}{\varphi_{s.c} m_{s.c.M} h_M}. \tag{7}$$

Using dependencies (4) for these ratios, we obtain:

$$\frac{\nu_P \cdot P_M}{P_M} = \frac{\varphi(\delta)\cdot\varphi_f\cdot\nu_m\cdot m_{f\cdot M}\cdot\nu_b\cdot b_M\cdot\nu_h\cdot h_M}{\varphi(\delta)\cdot\varphi_f\cdot m_{f\cdot M}\cdot b_M\cdot h_M} = \frac{\varphi_s\cdot\nu_{m_s}\cdot m_{s\cdot M}\cdot\nu_h^2\cdot h_M^2}{\varphi_s\cdot m_{s\cdot M}\cdot h_M^2} = \frac{\varphi_{s.c}\cdot\nu_{m_{s.c}}\cdot m_{s.c\cdot M}\cdot\nu_h\cdot h_M}{\varphi_{s.c}\cdot m_{s.c\cdot M}\cdot h_M}. \quad (8)$$

According to the similarity theorem, we reduce the expression (8), which results in the following relationship between the similarity coefficients:

$$\nu_P = \nu_m\cdot\nu_b\cdot\nu_h = \nu_{m_s}\cdot\nu_h^2 = \nu_{m_{s.c}}\cdot\nu_h. \quad (9)$$

Dividing all parts of equation (9) by, we obtain the system of equations:

$$\frac{\nu_P}{\nu_P} = 1;\quad \frac{\nu_m\cdot\nu_b\cdot\nu_h}{\nu_P} = 1;\quad \frac{\nu_{m_s}\cdot\nu_h^2}{\nu_P} = 1;\quad \frac{\nu_{m_{s.c}}\cdot\nu_h}{\nu_P} = 1; \quad (10)$$

that connect the six unknown quantities. All values are taken constructively, knowing the physical properties of the soil (Table 1) and the model.

Table 1

Physical and mechanical properties of soils

Soil	m_f, MPa	m_s, MPa	$m_{s.c}$, кN/м	μ	Dimensional characteristics of the destruction zone	
					$k_б$	γ
Marl clay	0,3	0,021	0,4	14°	0,8	30°
Heavy loam	0,15	0,013	1,42	18°	0,85	40°
Argillite	0,25	0,024	5,47	16°	0,9	30°
Paraffin	0,76	0,022	16,25	14°	0,8	36°

Conclusions

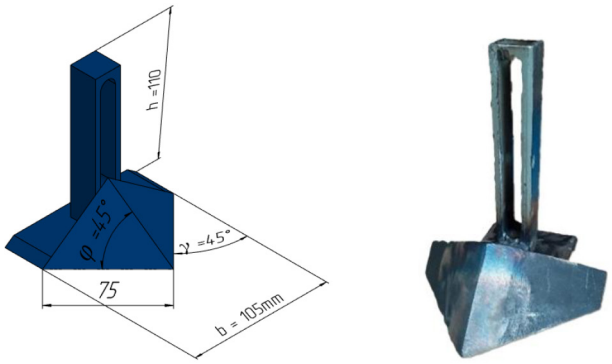
On the basis of the theory of similarity, the similarity coefficients were determined and listed in (Table 2), which were used to calculate the geometric and kinematic parameters of laboratory experiments. This made it possible to design and manufacture laboratory equipment: a stand and a spatially oriented experimental knife.

Table 2

Research equipment parameters

	Categories of soil		
	3	4	5
$\nu_m = \frac{m_{f.N}}{m_{f.M}}$	0,223	0,556	1,067
$\nu_{m.s} = \frac{m_{s.N}}{m_{s.M}}$	0,201	0,5	1,168
$\nu_{m.s.c} = \frac{m_{s.c.N}}{m_{s.c.M}}$	0,23	0,569	1,086
$\nu_h = \sqrt[3]{\frac{\nu_{m.s.c}}{\nu_{m.s}}}$	0,37	0,512	0,82
$\nu_b = \frac{\nu_{m.f}\cdot\nu_h}{\nu_p}$	0,45	0,504	0,77
$\nu_p = \nu_{m.s}\cdot\nu_{h^2}$	0,22	0,544	1,098

In accordance with the obtained similarity coefficients, a model of a spatially oriented knife [9] was created and adapted Fig. 2, and the test bench was improved Fig. 3. To conduct the study, we will use a bench for recording cutting forces [7], which is taken as a prototype and consists of a frame 1, on which a trolley 3 is mounted on guide beams using rollers 2, to which a holder 6 is attached through strain gauges 4 and 5, in which a transmission screw-nut 8 is fixed through the eyelets, the movement of the spatially orientated knife 9 is carried out by an electric motor 10 through a worm gear 7, in turn, the electric motor is controlled by a frequency converter 11. The trolley 3 is equipped with a lifting and



a *b*

Fig. 2. Spatially oriented knife of a bulldozer blade (*a*) 3D model, (*b*) real model

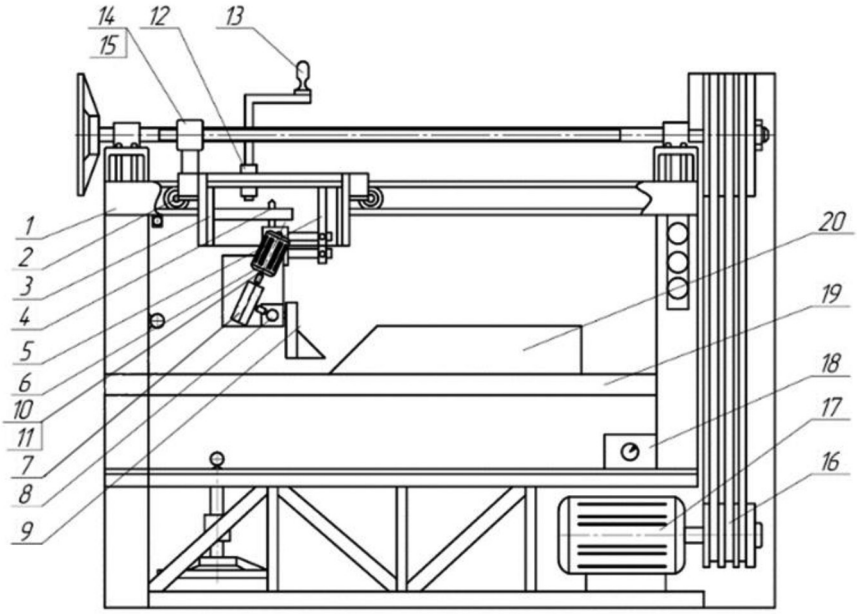


Fig. 3. Schematic of a test bench with a spatially orientated knife

lowering mechanism 12 with a handle 13. The possibility of horizontal movement of the trolley 3 is realised by means of a screw-nut gear 14–15, a V-belt gear 16 and an electric motor 17 connected through a frequency converter 18. The bunker with the test material 20 is fixed on the installation base 19 [8].

Bibliography

1. Ловейкін В.С. Теорія технічних систем: навчальний посібник / В.С.Ловейкін, І.І.Назаренко, О.Г.Онищенко. Київ-Полтава : ІЗМН-ПДТУ, 1998. 175 с.

2. Ловейкін В.С. Побудова фізичної моделі роликової формувальної установки з рекуперацiйним приводом / В.С.Ловейкін, К.І.Почка // Техніка будівництва. 2007. № 20. с. 26–31.

3. Ловейкін В.С. Динаміка роликової формувальної установки. Монографія / В.С.Ловейкін, К.І.Почка. К.-Ромни : КНУБА, «ІСА-Інтерпапір», 2009. 228 с.

4. Пелевін Л.Є. Обґрунтування вибору геометричних та динамічних параметрів моделювання різання ґрунту наконечником з консоллю / Л.Є.Пелевін, М.О.Пристайло // Техніка будівництва. 2012. № 28. с. 70–75.

5. Рашківський В.П., Федишин Б.М. Modelling of soil destruction process by bulldozer using a spatially oriented working unit. Трансфер інноваційних технологій, 2023. 6(1), 58–70. https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0202

6. Рашківський В.П., Федишин Б.М. Development of a parametric model of the spatially oriented knife on the bulldozer blade.. *Опір матеріалів і теорія споруд*: Науково-технічний збірник наукових праць. 2023. Випуск 111. P. 263–275. DOI: 10.32347/2410-2547.2023.111.263-275

7. Patent of Ukraine for an invention 13846, IPC G 01 L 5/16, G 01 N 3/58 (2006.01). Stand for registration of cutting efforts / L.Ye.Pelevin, M.O.Prystailo, T.Yu.Prystailo (Ukraine); applicant and patentee Research Institute

of Construction, Road and Engineering Technology, № u 2005 10393; stated 03.11.2005; published 17.04.2006, Bulletin № 4.

8. Рашківський В., Пристайло М., Федишин Б., & Балака, М. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2025. *4*(1), 79–92. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07

9. Максим'юк Ю.В., Рашківський В.П., Пристайло М.О., Федишин Б.М. Development and computer testing of equipment for cutting soils with spatially oriented knives of a bulldozer blade. *Опір матеріалів і теорія споруд*. Науково-технічний збірник наукових праць. 2024 Випуск 113. P. 285–296. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.285-296

References

1. Loveikin V.S., Nazarenko I.I., Onyshchenko O.H. Teoriya tekhnichnykh system [Theory of technical systems]: navchalnyi posibnyk [study guide]. Kyiv-Poltava, IZMN-PDTU [Institute of the content of teaching methods – Poltava State Technical University], 1998, 175 p.

2. Loveikin V.S., Pochka K.I. Pobudova fizychnoyi modeli rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky z rekuperatsiynym pryvodom [Construction of a physical model of a roller forming unit with a recuperative drive]. Tekhnika budivnytstva [Construction technology], 2007, no. 20, pp. 26-31.

3. Loveikin V.S., Pochka K.I. Dynamika rolykovoyi formuvalnoyi ustanovky [Dynamics of the roller forming unit]. Monohrafiya [Monograph]. Kyiv-Romny, KNUCA, "ISA-Interpapir", 2009, 228 p.

4. Pelevin L.E., Prystailo M.O. Obhruntuvannya vyboru heometrychnykh ta dynamichnykh parametriv modelyuvannya rizannya hruntu nakonechnykom z konsollyu [Justification of the choice of geometric and dynamic parameters of soil cutting modeling with a tip with a console]. Tekhnika budivnytstva [Construction technology], 2012, №. 28, pp. 70–75.

5. Rashkivskyi V.P., Fedyshyn B.M. Modelling of soil destruction process by bulldozer using a spatially oriented working unit. Transfer of innovative technologies. 2023. 6(1), 58–70. https://doi.org/10.32347/tit.2023.61.0202

6. Rashkivskyi V.P., Fedyshyn B.M. Development of a parametric model of the spatially oriented knife on the bulldozer blade. *Strength of Materials and Theory of Structure*: Scientific and technical collected articles. 2023. Issue 111. P. 263–275. DOI: https://doi.org/10.32347/2410-2547.2023.111.263-275.

7. Patent of Ukraine for an invention 13846, IPC G 01 L 5/16, G 01 N 3/58 (2006.01). Stand for registration of cutting efforts / L. Ye. Pelevin, M. O. Prystailo, T. Yu. Prystailo (Ukraine); applicant and patentee Research Institute of Construction, Road and Engineering Technology, № u 2005 10393; stated 03.11.2005; published 17.04.2006, Bulletin № 4.

8. Rashkivskyi V., Prystailo M., Fedyshyn B., & Balaka M. Methods of conducting a bench-scale experimental study with a spatially oriented knife of a bulldozer blade. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 2025. *4*(1), 79–92. https://doi.org/10.46299/j.isjea.20250401.07

9. Maksymiuk Yu.V., Rashkivskyi V.P., Prystailo M.O., Fedyshyn B.M. Development and computer testing of equipment for cutting soils with spatially oriented knives of a bulldozer blade. *Strength of Materials and Theory of Structures*. Scientific and technical collected articles. 2024 Issue 113. P. 285–296. https://doi.org/10.32347/2410-2547.2024.113.285-296

УДК 62-83(075.8) DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.26

О. В. РЯСНА
старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-6917-6950

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

В. О. КРАВЧЕНКО
кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4185-8279

В. М. КОЗІН
кандидат технічних наук,
доцент кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0001-9821-7774

О. Ю. ЮРЧЕНКО
старший викладач кафедри енергетики та електротехнічних систем
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3047-6654

СКАЛЯРНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ В СИСТЕМІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

У даній роботі розглянуто дослідження, яке спрямоване на підвищення ефективності роботи електроприводу насосної системи водопостачання в умовах виробництва. Призначення роботи – оптимізація енергоспоживання, підвищення надійності та забезпечення стабільного тиску у водопровідній мережі за допомогою сучасних електроприводних технологій.

Розглянуто систему автоматизованого керування, що складається з асинхронного електродвигуна, насоса, частотного перетворювача, контролера, сенсорів, напівпровідникових елементів (тиристорів та МОП-транзисторів) і панелі керування. Використання частотних перетворювачів дозволяє змінювати швидкість обертання насоса відповідно до потреби у воді, що знижує витрати електроенергії та подовжує термін служби обладнання.

Методологія дослідження базується на моделюванні роботи електроприводу насосного агрегату в середовищі MatLab Simulink, що демонструє переваги використання сучасних технологій та елементів автоматики для досягнення високої енергоефективності та оптимізації витрат на електроенергію. Впровадження передових силових напівпровідникових компонентів у поєднанні з перетворювачами частоти дозволяє плавно регулювати швидкість двигуна, значно зменшуючи споживання енергії та запобігаючи перевантаженням.

Результати досліджень показують, що застосування автоматизованих систем контролю тиску та рівня води додає ще один рівень надійності та енергоефективності. Система забезпечує стабільність водопостачання навіть при змінних навантаженнях, запобігаючи аваріям та зносу обладнання. Частотне регулювання значно знижує гідравлічні втрати, зменшує шум та вібрацію, покращуючи експлуатаційні характеристики насосної системи.

Оригінальність дослідження полягає у використанні скалярного методу керування роботою електроприводу, що дозволяє спростити алгоритми управління та покращити енергоефективність системи.

Практична цінність роботи полягає в можливості впровадження розробленої системи автоматизованого керування в реальні насосні станції, що сприятиме зменшенню енергоспоживання та підвищенню надійності їхньої роботи.

Використання електроприводу в системах водопостачання забезпечує автоматичне регулювання роботи насосного обладнання, підвищуючи енергоефективність, знижуючи експлуатаційні витрати та продовжуючи

термін служби обладнання завдяки плавному запуску, оптимальному навантаженню та інтеграції з релейним захистом для запобігання аварійним ситуаціям. Для забезпечення безперебійної роботи обладнання необхідно регулярно проводити контроль технічного стану електроприводу насоса та його обслуговування відповідно до встановлених норм і стандартів.

Ключові слова: *асинхронний двигун, регулювання швидкості обертання, насосне обладнання, скалярний метод, частотний перетворювач, транзистори, МОП-транзистори, біполярні транзистори з ізольованим затвором, напівпровідникові елементи: тиристори (одноопераційні, керовані), моделювання MatLab Simulink, датчики, контролер, автоматичне управління, контроль технічного стану електроприводу насосу, обслуговування.*

O. V. RYASNAYA
Senior Lecturer at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-6917-6950

O. YU. SAVOYSKYI
PhD, Associate Professor at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

V. O. KRAVCHENKO
PhD, Associate Professor, Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4185-8279

V. M. KOZIN
PhD, Associate Professor at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0001-9821-7774

O. YU. YURCHENKO
Senior Lecturer at the Department of Energy and Electrical Systems
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-3047-6654

SCALAR CONTROL METHOD OF ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVES IN WATER SUPPLY SYSTEM

The study is aimed at improving the efficiency of the electric drive of the water supply pumping system in production conditions.

The purpose of the work is to optimize energy consumption, increase reliability and ensure stable pressure in the water supply network using modern electric drive technologies.

An automated control system is considered, consisting of an asynchronous electric motor, pump, frequency converter, controller, sensors, semiconductor elements (thyristors and MOS transistors) and a control panel. The use of frequency converters allows you to change the pump rotation speed in accordance with the need for water, which reduces electricity consumption and extends the service life of the equipment.

The research methodology is based on modeling the operation of the electric drive of the pumping unit in the MatLab Simulink environment, which demonstrates the advantages of using modern technologies and automation elements to achieve high energy efficiency and optimize electricity costs. The introduction of advanced power semiconductor components in combination with frequency converters allows you to smoothly adjust the engine speed, significantly reducing energy consumption and preventing overloads.

The results show that the use of automated pressure and water level control systems adds another level of reliability and energy efficiency. The system ensures the stability of water supply even under variable loads, preventing accidents and equipment wear. Frequency control significantly reduces hydraulic losses, reduces noise and vibration, improving the performance of the pumping system.

The originality of the research lies in the use of a scalar method of controlling the operation of the electric drive, which allows simplifying control algorithms and improving the energy efficiency of the system.

The practical value of the work lies in the possibility of implementing the developed automated control system in real pumping stations, which will help reduce energy consumption and increase the reliability of their operation.

The use of an electric drive in water supply systems provides automatic regulation of the operation of pumping equipment, increasing energy efficiency, reducing operating costs and extending the service life of the equipment due to smooth start-up, optimal loading and integration with relay protection to prevent emergency situations. To ensure

uninterrupted operation of the equipment, it is necessary to regularly monitor the technical condition of the pump electric drive and its maintenance in accordance with established norms and standards.

Key words: *asynchronous motor, speed control, pumping equipment, scalar method, frequency converter, transistors, MOSFETs, insulated gate bipolar transistors, semiconductor elements: thyristors (single-ended, controlled), MatLab Simulink modeling, sensors, controller, automatic control, monitoring the technical condition of the pump electric drive, maintenance.*

Постановка проблеми

Спрямований на підвищення ефективності роботи електроприводу насосної системи водопостачання у виробничій сфері, зумовлений зростаючій потребі в енергозбереженні та оптимізації витрат на технологічні процеси. У сучасній промисловості стабільне та економічне водопостачання є важливим чинником, що безпосередньо впливає на продуктивність, якість і безпеку виробництва. Оскільки насосні установки є одними з найбільш енергоємних елементів інфраструктури, їхня оптимізація дає змогу суттєво зменшити експлуатаційні витрати.

Використання скалярного керування асинхронними двигунами забезпечує плавне регулювання швидкості обертання, що сприяє зниженню енергоспоживання. Якщо тиск або рівень води виходять за допустимі межі, система автоматично активує або вимикає відповідні насоси, запобігаючи аварійним ситуаціям та передчасному зношенню обладнання [5, 6].

Споживання води протягом доби коливається, з піковими витратами вранці та ввечері, та низьким рівнем вдень і вночі. При зміні споживання тиск у системі регулюється перетворювачем частоти, що плавно коригує швидкість обертання насоса для стабільного тиску. Прогрес у керованих асинхронних електроприводах став можливим завдяки розвитку потужних напівпровідникових компонентів, таких як тиристори та сучасні МОП- і біполярні транзистори. У системах водопостачання можна застосовувати методи контролю тиску у водопровідній мережі.

Сучасні системи регулювання тиску та продуктивності турбомеханізмів класифікуються за типом електричного струму та видом приводних двигунів, ділять на групи [7]: приводні системи на основі двигунів постійного струму; керовані приводи із синхронними електродвигунами; керовані системи з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором, які управляються механічними регуляторами та електромагнітними муфтами; приводні системи, що працюють на багатошвидкісних асинхронних двигунах; керовані приводи з асинхронними двигунами, оснащеними фазним ротором; приводні системи для асинхронних двигунів із регулюванням напруги; приводи на основі асинхронних двигунів із частотним перетворювачем.

Один із ключових аспектів підвищення ефективності – правильний вибір насосного обладнання. Насос повинен відповідати фактичним потребам системи за параметрами продуктивності та натиску, що дозволяє уникнути зайвих енергетичних витрат. Крім того, використання сучасних енергоефективних електродвигунів класу IE3 або IE4 сприяє зниженню енергетичних втрат завдяки мінімізації теплових втрат і механічного зношування [10, с. 12].

Одним із найбільш ефективних методів керування насосним обладнанням є впровадження частотних перетворювачів. Вони дозволяють змінювати швидкість обертання двигуна залежно від поточного рівня споживання води. Завдяки застосуванню цих технологій можна досягти зниження енергоспоживання на 20–50 % [10, с. 22].

Графічні залежності наочно ілюструють переваги цих пристроїв у порівнянні з традиційними методами керування насосами. На рисунку 1 представлено зміну напірних характеристик насосного агрегату залежно від частоти обертання. Крива 1 відповідає номінальній характеристиці, яка визначається стандартною частотою обертання приводу, тоді як криві 2–4 демонструють зміну характеристик при зниженій частоті обертання.

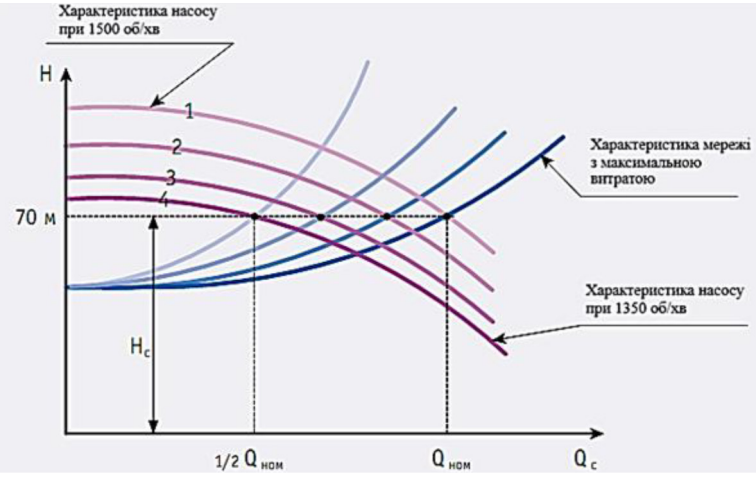


Рис. 1. Характеристики насосу та системи з регулюванням частоти

Варто підкреслити, що робота насосного обладнання на знижених швидкостях значно зменшує рівень шуму та вібрацій, що позитивно впливає на умови експлуатації. Це особливо важливо для житлових районів і промислових зон, де такі фактори можуть відігравати значну роль.

Формулювання мети дослідження

Регулювання електроприводів дозволяє стабільно підтримувати рівень тиску в системі, що знижує витрати на обслуговування та продовжує термін служби обладнання. Модернізація систем за допомогою елементів автоматизації та регулювання дозволяє оптимізувати витрати та знизити енергоспоживання. Автоматизована система, окрім частотного перетворювача, включає контролер і сенсори, що забезпечують стабільну роботу насоса при змінному навантаженні. Це дозволяє інтегрувати систему з іншими комплексами для моніторингу та діагностики, що знижує витрати та гарантує безперервність процесів.

Сучасні частотні перетворювачі оснащені широким спектром функцій, спрямованих на підвищення енергоефективності та захисту насосного обладнання. Вони забезпечують плавний запуск і зупинку, що запобігає гідравлічним ударам і зменшує навантаження на трубопроводи та з'єднання насосної системи. Крім того, вбудовані захисні механізми, такі як захист від перевантаження, перегріву та короткого замикання, гарантують безпечну та стабільну роботу системи. Функції енергозбереження дозволяють оптимізувати споживання електроенергії, зокрема завдяки автоматичному регулюванню швидкості обертання насоса відповідно до поточного рівня споживання води.

Значну роль у зручності експлуатації відіграють інтуїтивний інтерфейс і можливість дистанційного керування. Частотні перетворювачі, що використовуються в насосних системах, часто підтримують функції віддаленого моніторингу та контролю, що дає змогу оперативно змінювати параметри роботи без необхідності фізичного доступу до обладнання. Це особливо актуально для автоматизованих систем водопостачання та насосних станцій, які потребують постійного моніторингу та регулювання робочих параметрів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Виконаємо розрахунок механічних та електромеханічних характеристик асинхронного електродвигуна насосного агрегату відповідно до заданого закону $\frac{U_{1н}}{f}$. Розраховуємо для частот f_1 = 50, 40, 30, 15 Гц.

Знаходимо відносне значення частот напруги живлення [13, с. 24]:

при вищевказаних частотах 1, 0,8, 0,6, 0,3 Гц за формулою 1:

$$f_{1/1,2,3,4} = \frac{f_{1н}}{f_{1н}}. \tag{1}$$

Визначаємо фазну напругу обмотки статора асинхронного електродвигуна насоса – 220, 176, 132, 66 В стосовно формули 2:

$$U_{1н1,\,2,\,3,\,4} = z_p \cdot f_{1н1}. \tag{2}$$

Згідно з досліджуваними частотами напруги живлення, проводимо розрахунок величин швидкості ідеального холостого ходу – 314,16; 251,33; 188,49; 94,29 рад/с [13], використовуючи формулу 3:

$$\omega_{01,2,3,4} = \frac{2\pi f_{1н1}}{p}. \tag{3}$$

Розраховуємо втрати в роторі під час роботи з насосним агрегатом під час навантаження. Визначаємо функцію навантаження.

Вентиляторне навантаження для насосного агрегату можна представити такою функцією [12]:

$$M_c = M_0 + (M_{c.ном} - M_0) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}}\right)^{(X-1)}, \tag{4}$$

де M_C – моменти навантаження насосного агрегату при швидкості обертання ω; $M_{c.ном}$ – моменти навантаження при швидкості обертання $\omega_{ном}$; M_0 – моменти тертя у вузлах; X – показник степені, що для насосного навантаження відповідає $X = 3$.

Аналіз механічних характеристик показує, що при 15 Гц кутова швидкість становить ~100 рад/с, а момент – 10 Н · м, що підходить для легких навантажень. При 30 Гц швидкість зростає до 200 рад/с, а момент – до 15 Н · м, забезпечуючи більшу потужність і швидкість.

Моделювання роботи АД насосного агрегату виконаємо на платформі MATLAB Simulink. Для цього знайдемо деякі наступні параметри електродвигуна [11].

Досліджувані значення індуктивності обмотки ротора складає 0,00801 Гн за формулою 5:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1H}}{2\pi f_{1H}}. \tag{5}$$

Значення індуктивності фази обмоток статора складає 0,012 Гн:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2H}}{2\pi f_{1H}}. \tag{6}$$

Величина індуктивності намагнічування є 0,18 Гн:

$$L_{\mu} = \frac{X_{\mu H}}{2\pi f_{1H}}. \tag{7}$$

Модель імітації прямого пуску асинхронного двигуна насосного агрегату представлена на рис. 2. На рис. 3 і 4 зображені перехідні характеристики швидкостей та моментів під час прямого запуску асинхронного двигуна насосного агрегату.

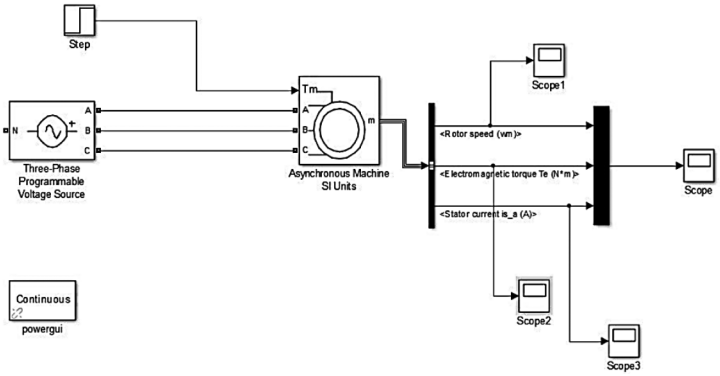


Рис. 2. Імітаційна модель прямого пуску АД насосного агрегату

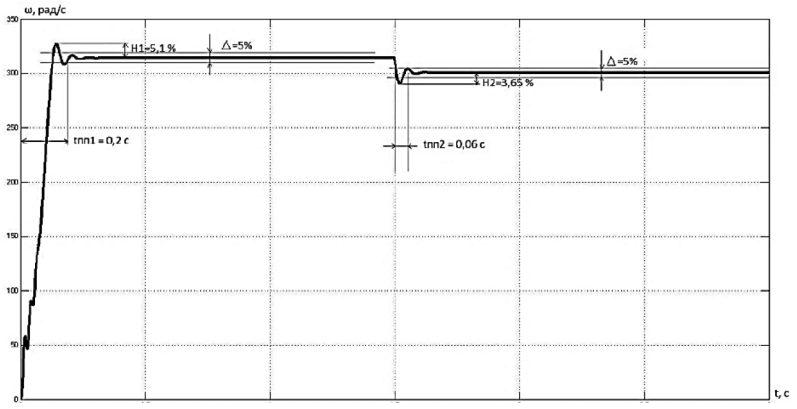


Рис. 3. Перехідна характеристика швидкості АД при прямому пуску

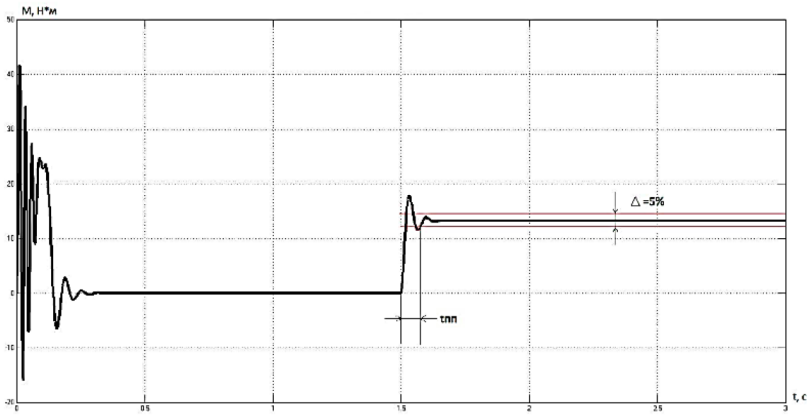


Рис. 4. Перехідна характеристика моменту АД при прямому пуску

Отримані результати (рис. 3 та рис. 4) показують, що під час прямого пуску час перехідного процесу показує перерегулювання. І при стрибку навантаження час перехідного процесу становить, перерегулювання.

Розроблена в MATLAB Simolink імітаційна модель скалярного керування швидкістю обертання АД насосного агрегату з автоматичною системою регулювання води в резервуарі зображена на рис. 5.

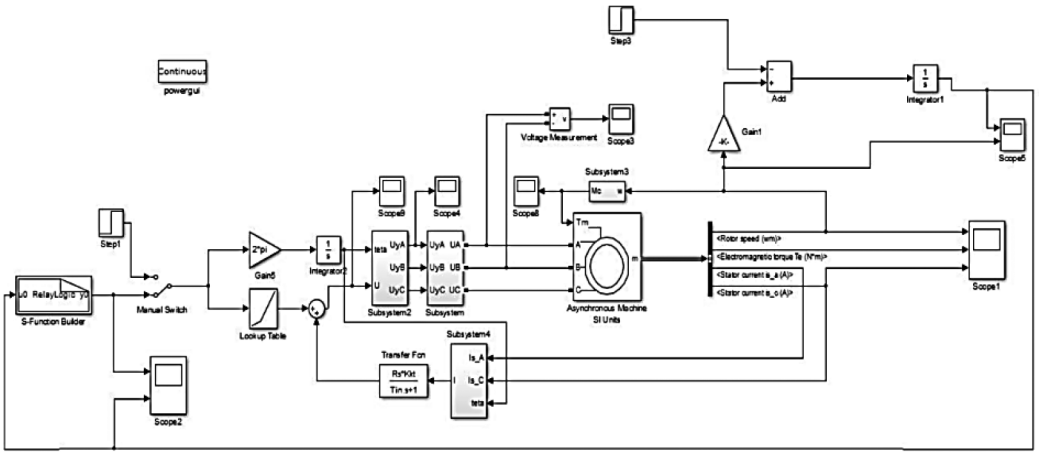


Рис. 5. Імітаційна модель скалярного керування швидкістю обертання АД насосного агрегату з автоматичною системою регулювання води в резервуарі

Структурна схема системи скалярного частотного керування електроприводом насосного агрегату, розроблена на основі імітаційної моделі, показана на рис. 6.

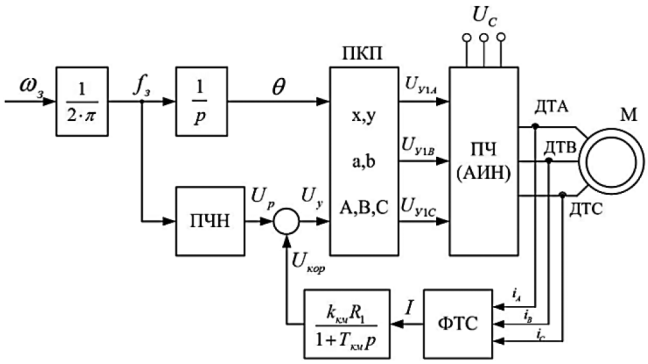


Рис. 6. Структурна схема системи скалярного частотного керування насосного агрегату

У цій моделі використано автоматизовану систему контролю рівня води в резервуарі на основі релейної логіки (S-FunktionBuilder). При рівні води понад 3 м насос вимикається (0 Гц), а при падінні нижче 1,5 м вмикається (50 Гц), підтримуючи циклічний процес наповнення.

Моделювання показало, що без відбору води резервуар (100 м^3) заповнюється за 15,55 годин, а підйом рівня з 1,5 м до 3 м триває 5 годин. При споживанні води цей час збільшується до 10 годин.

Висновки

Впровадження частотних перетворювачів у систему керування насосами водопостачання дозволяє знизити енергоспоживання на 20–50 % завдяки регулюванню швидкості обертання насоса. Автоматизовані системи контролю тиску та рівня води забезпечують стабільність роботи насосного обладнання і мінімізують ризик аварійних ситуацій. Використання частотного перетворювача дозволяє забезпечити плавний запуск і зупинку насоса, що знижує механічні навантаження на обладнання, подовжуючи його термін служби.

Моделювання показало, що застосування скалярного керування для насосного агрегату дозволяє досягти значної економії енергоспоживання та знизити експлуатаційні витрати. Моделювання системи з автоматичним регулюванням рівня води підтвердило ефективність використання частотних перетворювачів для забезпечення стабільного водопостачання та оптимізації роботи насосного агрегату.

Список використаної літератури

1. Shankar, V.K.A., Umashankar, S., Paramasivam, S., & Hanigovszki, N. (2016). A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. Applied Energy, 181, 495–513. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070

2. Augustyn, T. (2012). Energy efficiency and savings in pumping systems – The holistic approach. In Proceedings of the Southern African Energy Efficiency Convention (SAEEC). https://doi.org/10.1109/saeec.2012.6408587

3. Moreno, M., Carrión, P., Planells, P., Álvarez, J.F.O., & Tarjuelo, J. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. Biosystems Engineering, 98(4), 479–486. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.005.

4. Moshnoriz, M., Babiy, S., Payanok, A. (2021). Improving the efficiency of distributed water supply systems by means of an adjustable electric drive. Scientific Horizons. Vol. 24, No. 5. P. 19–34.

5. Грабко, В.В., Мошноріз М.М. (2011). Метод та засоби оптимізації роботи електроприводів насосної станції водопостачання: монографія. Вінниця : ВНТУ. 138 с.

6. Гарасьова, Н. Ю., Величко, Т. В. (2014). Оцінка ефективності роботи регульованого електроприводу насосу при змінному графіку водоспоживання. Наукові записки, вип.15. С. 86–88.

7. Мошноріз, М.М. (2009). Синтез структури пристрою керування запуском двигуна великої потужності. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 4(57), Ч. 1. С. 36–39.

8. Мошноріз, М., Грабко, В. (2008). Підвищення ефективності керування насосними агрегатами станції водопостачання. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 3(50). Ч. 1. С. 145–148.

9. Попович, М.Г., Печеник, М.В., Кіселичник, О.І., Ковальчук О.В. (2002). Особливості організації екстремальних енергозберігаючих систем при різних методах керування асинхронних електроприводів. Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Вип. 1(12). С. 129–132.

10. Xu, X., Zhou, H., & Mao, L. (2011). Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. https://doi.org/10.1109/emeit.2011.6023557

11. Bolognani, S., & Zampieri, S. (2013). A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids. IEEE Transactions on Automatic Control, 58(11), 2818-2833. https://doi.org/10.1109/tac.2013.2270317

12. Давидов, О.Ю., Бялобржеський, О.В. (2010). Аналіз засобів компенсації реактивної потужності в електротехнічних системах. Діагностика в електромеханічних і енергетичних системах. Вісник КрНУ ім. М. Остроградського. Вип. 3/2010 (62). Ч. 1. С.132–136.

13. Zieliński, D., Stefańczak, B., & Jędrys, K. (2022). Phase-Independent Reactive Power Compensation Based on Four-Wire Power Converter in the Presence of Angular Asymmetry between Voltage Vectors. Energies, 15(2), 497. https://doi.org/10.3390/en15020497

References

1. Shankar, V.K.A., Umashankar, S., Paramasivam, S., & Hanigovszki, N. (2016). A comprehensive review on energy efficiency enhancement initiatives in centrifugal pumping system. Applied Energy, 181, 495–513. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.070

2. Augustyn, T. (2012). Energy efficiency and savings in pumping systems – The holistic approach. In Proceedings of the Southern African Energy Efficiency Convention (SAEEC). https://doi.org/10.1109/saeec.2012.6408587

3. Moreno, M., Carrión, P., Planells, P., Álvarez, J.F.O., & Tarjuelo, J. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. Biosystems Engineering, 98(4), 479–486. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.005

4. Moshnoriz, M., Babiy, S., Payanok, A. (2021). Improving the efficiency of distributed water supply systems by means of an adjustable electric drive. Scientific Horizons. Vol. 24, No. 5. P. 19–34.

5. Hrabko, V.V., Moshnoriz M.M. (2011). Metod ta zasoby optymizatsii roboty elektropryvodiv nasosnoi stantsii vodopostachannia [Method and means of optimizing the operation of electric drives of a water supply pumping station] *monohrafiia – monograph*. Vinnytsia: VNTU. 138 s. [in Ukrainian]

6. Harasova, N.Yu., Velychko, T.V. (2014). Otsinka efektyvnosti roboty rehulovanoho elektropryvodu nasosu pry zminnomu hrafiku vodospozhyvannia [Evaluation of the efficiency of the adjustable electric pump drive with a variable water consumption schedule] *Naukovi zapysky – Proceedings*, vyp. 15. S. 86–88. [in Ukrainian].

7. Moshnoriz, M.M. (2009). Syntez struktury prystroiu keruvannia zapuskom dvyhuna velykoi potuzhnosti. [Synthesis of the structure of a high-power engine start control device.] *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University* Vypusk 4(57), Ch. 1. S. 36–39. [in Ukrainian].

8. Moshnoriz, M., Hrabko, V. (2008). Pidvyshchennia efektyvnosti keruvannia nasosnymy ahrehatamy stantsii vodopostachannia. [Increasing the efficiency of water supply station pumping unit control]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskoho – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University*. Vypusk 3(50). Ch. 1. S. 145–148. [in Ukrainian].

9. Popovych, M.H., Pechenyk, M.V., Kiselychnyk, O.I., Kovalchuk O.V. (2002). Osoblyvosti orhanizatsii ekstremalnykh enerhozberihaiuchykh system pry riznykh metodakh keruvannia asynkhronnykh elektropryvodiv [Features of the organization of extreme energy – saving systems with different control methods for asynchronous electric drives]. *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu – Bulletin of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi State Polytechnic University* Vyp. 1(12). S. 129–132. [in Ukrainian].

10. Xu, X., Zhou, H., & Mao, L. (2011). Research on intelligent frequency conversion control system of pumping unit with auto-adapted function. Proceedings of 2011 International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology. https://doi.org/10.1109/emeit.2011.6023557

11. Bolognani, S., & Zampieri, S. (2013). A distributed control strategy for reactive power compensation in smart microgrids. IEEE Transactions on Automatic Control, 58(11), 2818–2833. https://doi.org/10.1109/tac.2013.2270317

12. Davydov, O.Yu., Bialobrzheskyi, O.V. (2010). Analiz zasobiv kompensatsii reaktyvnoi potuzhnosti v elektrotekhnichnykh systemakh [Analysis of reactive power compensation means in electrical systems. Diagnostics in electromechanical and power systems]. *Visnyk KrNU im. M.Ostrohradskoho – Bulletin of the M.Ostrohradskyi KrNU*. Vyp. 3/2010 (62). Ch. 1. C.132–136 [in Ukrainian].

13. Zieliński, D., Stefańczak, B., & Jędrys, K. (2022). Phase-Independent Reactive Power Compensation Based on Four-Wire Power Converter in the Presence of Angular Asymmetry between Voltage Vectors. Energies, 15(2), 497. https://doi.org/10.3390/en15020497

УДК 656.1/629.07 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.27

О. Ю. САВОЙСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
завідувач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-6459-4931

О. В. ТАЦЕНКО
старший викладач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-1762-8219

О. О. СОЛАРЬОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-1485-0685

Ю. І. СЕМІРНЕНКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-4230-4614

О. А. САРЖАНОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-3973-0185

Т. П. ВОЛОШКО
старший викладач кафедри транспортних технологій
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-2605-8836

ДО ПИТАННЯ ОБГРУНТУВАННЯ ТИПІВ АВТОТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ ВАНТАЖОПЕРЕВЕЗЕНЬ У ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ

Проблема вибору автотранспортних засобів для вантажоперевезень є актуальною для транспортної сфери, оскільки ефективність транспортування безпосередньо впливає на продуктивність підприємств, рівень витрат і своєчасність доставки продукції. Традиційні підходи до оцінки транспортних засобів зазвичай базуються на окремих критеріях, таких як витрати палива, вантажопідйомність чи собівартість перевезення, що не завжди дозволяє знайти оптимальний варіант у реальних умовах експлуатації. Врахування комплексу показників, зокрема техніко-економічних, екологічних та експлуатаційних факторів, значно ускладнює процес ухвалення рішення.

У роботі обґрунтовано підхід до підбору автотранспортних засобів для вантажоперевезень на основі багатокритеріальної оцінки автотранспортних засобів на основі методу відстані до цілі, що дозволяє комплексно аналізувати альтернативні варіанти та вибирати найбільш ефективне рішення. При виконанні даної роботи було враховано такі критерії, як витрати пального, продуктивність транспортного засобу, затрати праці та змінні витрати (собівартість перевезення). Для об'єктивного визначення оптимального варіанту автотранспортного засобу для виконання вантажоперевезень застосовано метод розставлення пріоритетів, який дає змогу встановити значущість кожного із базових критеріїв та здійснити ранжування альтернатив.

Отримані результати можуть бути використаний для підбору автотранспортних засобів не лише у транспортній сфері, а й у інших галузях, де важливо поєднувати економічну доцільність із технічними, економічними та іншими показниками. Використання методу багатокритеріальної оцінки дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо вибору типу і марки автотранспортних засобів, що сприятиме раціональному використанню ресурсів та підвищенню ефективності транспортних технологій і систем.

Ключові слова: *автотранспортні засоби, моделювання, оптимізація, транспортні технології, раціоналізація перевезень, багатокритеріальна оцінка, підвищення ефективності.*

O. YU. SAVOISKYI
Candidate of Technical Sciences,
Head of Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-6459-4931

O. V. TATSENKO
Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-1762-8219

O. O. SOLAROV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-1485-0685

YU. I. SEMIRNENKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-4230-4614

O. A. SARZHANOV
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-3973-0185

T. P. VOLOSHKO
Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-2605-8836

ON THE JUSTIFICATION OF VEHICLE TYPES FOR FREIGHT TRANSPORTATION IN TRANSPORT TECHNOLOGIES

The problem of selecting motor vehicles for freight transportation is relevant to the transport sector, as transportation efficiency directly affects business productivity, cost levels, and the timeliness of product delivery. Traditional approaches to evaluating vehicles are usually based on individual criteria, such as fuel consumption, payload capacity, or transportation cost, which do not always allow for the identification of the optimal option under real operating conditions. Considering a comprehensive set of indicators, including technical, economic, environmental, and operational factors, significantly complicates the decision-making process.

This study substantiates an approach to the selection of motor vehicles for freight transportation based on a multi-criteria evaluation method using the distance-to-target method, which enables a comprehensive analysis of alternative options and the selection of the most efficient solution. The study considers criteria such as fuel consumption, vehicle productivity, labor costs, and variable costs (transportation cost). To objectively determine the optimal vehicle for freight transportation, a prioritization method was applied, allowing for the assessment of the significance of each basic criterion and the ranking of alternatives.

The obtained results can be used for selecting motor vehicles not only in the transport sector but also in other industries where it is essential to combine economic feasibility with technical, economic, and other performance indicators. The use of the multi-criteria evaluation method enables well-founded decision-making regarding the choice of vehicle type and brand, contributing to the rational use of resources and the improvement of transport technologies and systems.

Key words: *motor vehicles, modeling, optimization, transport technologies, transportation rationalization, multi-criteria evaluation, efficiency improvement.*

Постановка проблеми

Транспортні засоби та технології перевезення різних типів вантажів відіграють надзвичайно важливу роль у розвитку сучасного виробничого комплексу країни. Вони забезпечують доставку необхідних ресурсів до місць призначення, а також своєчасне виконання технологічних процесів у технологічних процесах виробничих

підрозділів народного господарства. Ефективна транспортна система, яка використовується у виробничих підприємствах, являється невід'ємною частиною успішного бізнесу для виробничих підприємств [1–3].

У сучасних умовах розвитку транспортної галузі вибір автотранспортних засобів для вантажоперевезень є складним і багатофакторним завданням. Традиційні методи оцінки техніки базуються переважно на одиничних критеріях, таких як вантажопідйомність, витрати пального або експлуатаційні витрати, що не завжди дозволяє обрати раціональний та оптимальний варіант для реальних умов транспортування вантажів. Водночас виробничі підприємства стикаються з необхідністю підвищення ефективності автотранспортних перевезень, зменшення витрат, забезпечення безпечних умов транспортування та відповідності нормативним вимогам.

У зв'язку з цим постає завдання впровадження раціональних методів підбору автотранспортних засобів на основі врахування всіх факторів, які впливають на ефективність процесів транспортування. Однією із таких методик є багатокритеріальна оцінка показників використання автотранспортних засобів, яка забезпечує аналіз та комплексну оцінку альтернативних варіантів. Вона сприяє раціональному вибору найбільш прийняття ефективних рішень щодо вибору автотранспортних засобів для вантажоперевезень у виробничій сфері.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Питання оптимізації вибору автотранспортних засобів для вантажоперевезень на основі багатокритеріальної оцінки викликає значний інтерес серед науковців і практиків у галузі транспорту та сфері впровадження транспортних технологій. Науковці активно працюють над розробкою, випробуванням і впровадженням сучасних методик, що дозволяють враховувати широкий спектр критеріїв роботи автотранспортних засобів для транспортних процесів.

У роботі [4] досліджено вплив ключових факторів при плануванні транспортування вантажів, таких як умови перевезення, обсяг вантажу, вибір маршруту та склад рухомого складу. Встановлено, що ефективність реалізації транспортних задач значною мірою залежить від правильного визначення критеріїв ефективності рухомого складу підприємств, що в свою чергу, дозволяє досягти раціональних та оптимальних результатів у процесі використання автотранспорту та виконання перевезень.

Авторами [5] запропоновано удосконалену методику вибору маршруту руху автотранспортного засобу для досягнення максимального економічного ефекту під час доставки продукції. Дослідниками зазначено, що під час формування розвізної мережі, окрім затрат на доставку та маршрутів перевезення, необхідно також враховувати тип автотранспортного засобу, особливості вантажу та терміни його доставки.

У роботі [6] розглянуто методи багатокритеріальної оптимізації ланцюгів постачань для організації поставок вантажів. Авторами представлено основні підходи до розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, що дозволяють знаходити оптимальні або компромісні рішення у системах логістики.

Методи багатокритеріального прийняття рішень при перевезенні вантажів також розглянуто у роботі [7] для оптимального вибору транспортних технологій у транспортних мережах. Це важливо в контексті сучасних тенденцій розвитку логістики перевезень, впровадження енергозберігаючих технологій у відповідності екологічним стандартам, що відповідає цілям сталого розвитку (ЦСР) та підвищенню енергетичної ефективності транспортних засобів [8, 9].

Сучасні дослідження підкреслюють важливість комплексного підходу до вибору автотранспортних засобів для вантажоперевезень. Врахування різноманітних критеріїв використання для вирішення виробничих завдань, таких як умови експлуатації, технічні характеристики автотранспортних засобів, економічні та екологічні показники, дозволяє підвищити ефективність транспортних процесів та забезпечити якісну доставку вантажів.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є обґрунтування типів автотранспортних засобів для вантажоперевезень на основі багатокритеріальної оцінки показників їх роботи, що дозволить здійснювати комплексний підхід по підбору та сприятиме раціональному вибору найбільш ефективних рішень для вантажоперевезень.

Викладення основного матеріалу дослідження

Системний підхід до вибору автотранспортних засобів потребує врахування множини критеріїв для оцінки альтернативних варіантів. У більшості випадків ухвалене рішення повинно відповідати декільком критеріям, які можуть суперечити один одному. Наприклад, підвищення продуктивності може призвести до зниження якості чи збільшення часу доставки, збільшення рівня механізації може спричинити зростання витрат на паливо-мастильні матеріали, а скорочення паливних витрат може супроводжуватися збільшенням загальних витрат на виконання робіт.

Однією з основних проблем обґрунтування автотранспортних засобів є створення єдиної системи оцінювання, яка б коректно враховувала всі критерії, які мають різні фізичні характеристики. Це значно ускладнює процедуру прийняття оптимального рішення.

У загальному випадку математична модель багатокритеріальної оцінки може бути представлена у вигляді [10]:

$$MM = T, S, U, L, H, Y \quad (1)$$

де T – тип задачі для багатокритеріальної оцінки (ранжування, оптимізація, вибір); S – множина можливих варіантів характеристик досліджуваної системи; U – набір критеріїв, за якими здійснюється оцінювання системи;

L – шкала оцінювання для кожного окремого критерію; H – система пріоритетів особи, яка приймає рішення, стосовно множини можливих варіантів; Y – правило прийняття рішення, що встановлює відношення переваги між варіантами з урахуванням системи пріоритетів.

Підходи до розв'язання багатокритеріальних задач поділяються на два основні напрями: оптимізацію та вибір, які відрізняються між собою застосовуваним правилом ухвалення рішення. Оптимізаційні методи використовуються в тих випадках, коли існує можливість об'єднання всіх критеріїв в один загальний (інтегральний) показник. У таких ситуаціях вибір рішення ґрунтується на застосуванні детермінованих методів оптимізації багатозмінних функцій.

У практичній техніко-технологічній діяльності частіше застосовують методи багатокритеріального вибору серед наявної множини альтернативних рішень. Одним із таких підходів є метод відстані до цілі, який базується на порівнянні кожного окремого варіанта з ідеалізованим рішенням. Ідеалізований варіант визначається шляхом формування умовного еталону, що містить найкращі значення всіх критеріїв з розглянутої множини альтернатив. При цьому важливо, щоб усі обрані критерії мали однакову спрямованість щодо покращення, тобто зміни показників слід уніфікувати таким чином, щоб їх зростання або зменшення відповідало бажаному напряму оптимізації.

Якщо всі критерії мають однаковий рівень значимості, то для кожного j-го варіанта з початкової множини альтернатив обчислюється відповідне значення показника відстані до цілі [10]:

$$\mu_i = \frac{1}{N}\left(\frac{U_{ij}}{U_{io}} - 1\right), \tag{2}$$

де μ_i – значення показника відстані до цілі j-го варіанту; N – кількість критеріїв, за якими здійснюється оцінювання; U_{ij} – величина і-го критерію j-го варіанту; U_{io} – величина і-го критерію для ідеалізованого варіанту.

З наявного набору альтернатив обирається варіант, який найбільше наближений до ідеального, для якого значення показника відстані до цілі наближається до нульового значення.

Якщо критерії, за якими здійснюється оцінювання системи, нерівноцінні, то рівень значимості критеріїв визначають методом розставлення пріоритетів. У такому випадку, коефіцієнт значущості критеріїв визначається за виразом [10]:

$$\lambda_i = \frac{P_{ij}}{\sum P_{ij}}, \tag{3}$$

де P_{ij} – сума добутків кожного з елементів і-го рядка на елементи вектор-стовпчика $\sum K_{ij}$ матриці для визначення рівня значущості критеріїв:

$$P_{ij} = K_{ij} \sum K_{ij}. \tag{4}$$

На основі визначених коефіцієнтів значущості критеріїв розраховується величина показника відстані до цілі для встановленої множини альтернативних рішень [10]:

$$\mu_i = \sum\left(\left[\frac{U_{ij}}{U_{io}} \cdot \lambda_i\right] - 1\right). \tag{5}$$

Для оцінки методики було розв'язано практичне транспортне завдання на основі реалізації транспортно-технологічних перевезень продукції (вантажів). Обґрунтування раціонального автотранспортного засобу проводили на основі багатокритеріальної оцінки в залежності від техніко-економічних показників та умов їх роботи.

Множина запропонованих критеріїв наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Множина критеріїв

Критерій	Назва критерія, од. виміру
К1	Затрати праці Зп, люд·год/т·км
К2	Витрата палива автотранспортним засобом Qл, л/100 км
К3	Продуктивність автотранспортного засобу Wгод, т·км/год
К4	Змінні витрати (собівартості перевезення) &, грн/км

У ідеалізованому варіанті показники повинні бути:
- затрати праці → min;
- витрати палива автотранспортним засобом → min;
- продуктивність автотранспортного засобу → max;
- змінні витрати (собівартість перевезення) → min.

За основний критерій було прийнято змінні витрати (собівартість перевезення). Тоді, після розставлення знаків домінування в залежності від пріоритетів виробничих завдань маємо: $K_1 = K_2 < K_3 < K_4$.

З метою визначення і обгрунтування використання автотранспортних засобів для реалізації транспортно-технологічних перевезень продукції (вантажів) обрано чотири альтернативних автотранспортні засоби: I – МАН TGS 41.430 8X4 BB; II – KAMAZ-45143; III – МАЗ 6422; IV – УАК DONGFENG LD41. Результати комплексної багатокритеріальної оцінки автотранспортних засобів за системою обраних критеріїв (табл. 1), наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати комплексної оцінки автотранспортних засобів

Варіант	Марка автотранспортного засобу	К1	К2	К3	К4
1	МАН TGS 41.430 8X4 BB	0,0025	38,00	400,00	39,05
2	KAMAZ-45143	0,0040	28,60	250,00	31,47
3	МАЗ 6422	0,0040	32,80	250,00	33,91
4	УАК DONGFENG LD41	0,0067	24,60	150,00	26,84

Визначається значущість критеріїв λі, на основі використання методу розставлення пріоритетів.

Відповідно до виразів (3) та (4), при $K_1 = K_2 < K_3 < K_4$, маємо:

– для 1-го рядка матриці:

$$P_{1j} = K_{11}\sum K_1 + K_{12}\sum K_2 + K_{13}\sum K_3 + K_{14}\sum K_4; \quad (6)$$

– для 2-го рядка матриці:

$$P_{2j} = K_{21}\sum K_1 + K_{22}\sum K_2 + K_{23}\sum K_3 + K_{24}\sum K_4; \quad (7)$$

– для 3-го рядка матриці:

$$P_{3j} = K_{31}\sum K_1 + K_{32}\sum K_2 + K_{33}\sum K_3 + K_{34}\sum K_4; \quad (8)$$

– для 4-го рядка матриці:

$$P_{4j} = K_{41}\sum K_1 + K_{42}\sum K_2 + K_{43}\sum K_3 + K_{44}\sum K_4. \quad (9)$$

Матриця визначення значущості критеріїв наведена в таблиці 3. При попарному порівнянні критеріїв у відповідних комірках матриці проставляються коефіцієнти переваг при $K_1 = K_2 < K_3 < K_4$. Якщо критерій в *i*-тому рядку має перевагу над критерієм в *j*-у стовпчику, то коефіцієнти приймають 1,5, при їх однаковій значущості – 1,0, а при меншій – 0,5.

Таблиця 3

Матриця визначення значущості критеріїв

Критерії	К1	К2	К3	К4	$\sum_1^4 k_j$	Pij	λі
К1	1	1	1,5	1,5	5	19	0,3193
К2	1	1	1,5	1,5	5	19	0,3193
К3	0,5	0,5	1	1,5	3,5	12,25	0,2059
К4	0,5	0,5	0,5	1	2,5	9,25	0,1554
∑	3	3	4,5	5,5	16	59,5	1

Відповідно до виразу (5), складемо рівняння для визначення відстані до цілі для заданої множини альтернативних варіантів:

$$\mu_{1j} = \left(\frac{З_{П1j}}{З_{П0j}}\cdot\lambda_1 - 1\right) + \left(\frac{З_{П2j}}{З_{П0j}}\cdot\lambda_1 - 1\right) + \left(\frac{З_{П3j}}{З_{П0j}}\cdot\lambda_1 - 1\right) + \left(\frac{З_{П4j}}{З_{П0j}}\cdot\lambda_1 - 1\right); \quad (10)$$

$$\mu_{2j} = \left(\frac{Q_{л1j}}{Q_{л0j}}\cdot\lambda_2 - 1\right) + \left(\frac{Q_{л2j}}{Q_{л0j}}\cdot\lambda_2 - 1\right) + \left(\frac{Q_{л3j}}{Q_{л0j}}\cdot\lambda_2 - 1\right) + \left(\frac{Q_{л4j}}{Q_{л0j}}\cdot\lambda_2 - 1\right); \quad (11)$$

$$\mu_{3j} = \left(\frac{W_{год1j}}{W_{год0j}}\cdot\lambda_3 - 1\right) + \left(\frac{W_{год2j}}{W_{год0j}}\cdot\lambda_3 - 1\right) + \left(\frac{W_{год3j}}{W_{год0j}}\cdot\lambda_3 - 1\right) + \left(\frac{W_{год4j}}{W_{год0j}}\cdot\lambda_3 - 1\right); \quad (12)$$

$$\mu_{4j} = \left(\frac{\&_{1j}}{\&_{0j}} \cdot \lambda_4 - 1\right) + \left(\frac{\&_{2j}}{\&_{0j}} \cdot \lambda_4 - 1\right) + \left(\frac{\&_{3j}}{\&_{0j}} \cdot \lambda_4 - 1\right) + \left(\frac{\&_{4j}}{\&_{0j}} \cdot \lambda_4 - 1\right). \quad (13)$$

Вихідна множина альтернативних варіантів та критеріїв, а також результати розрахунку відстані до цілі для заданої множини альтернативних варіантів за виразами (10)–(13) наведено в таблиці 4. Графічне відображення значення показника відстані до цілі для автотранспортних засобів показано на рис. 1.

Таблиця 4

Вихідна множина альтернативних варіантів та критеріїв

Критерії / Варіанти	Зп, К1	Qл, К2	Wгод, К3	&, К4	μ
МАН TGS 41.430 8X4 BB	0,0025	38,00	400,00	39,05	–1,8030
KAMAZ-45143	0,0040	28,60	250,00	31,47	–2,3903
МАЗ 6422	0,0040	32,80	250,00	33,91	–3,4596
УАК DONGFENG LD41	0,0067	24,60	150,00	26,84	–3,2397
Ідеалізований варіант	0,0025	24,60	400,00	26,84	0

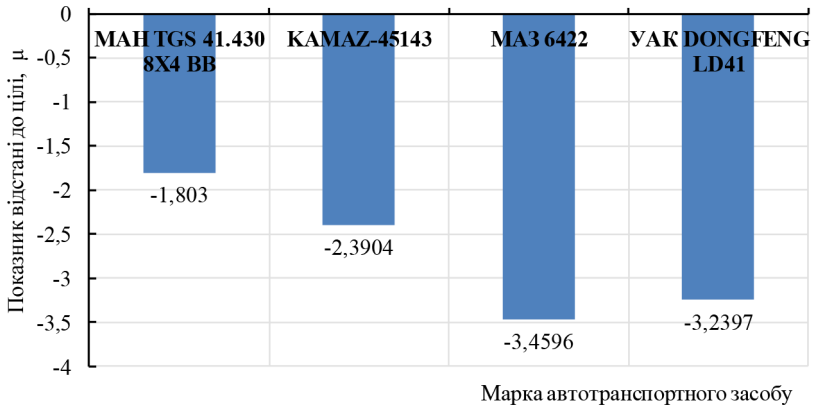


Рис. 1. Показники відстані до цілі для альтернативних варіантів автотранспортних засобів

Найкращий показник відстані до цілі є той, що знаходиться ближче до нульового значення. Аналіз отриманих результатів розрахунків показує, що найкраще даній умові відповідає варіант I автотранспортного засобу – МАН TGS 41.430 8X4 BB, для якого μ= –1,8030.

Таким чином, наведена методика на основі техніко-експлуатаційних і економічних показників дозволяє підібрати і обґрунтувати раціональний тип і вид автотранспортного засобу для виконання транспортних робіт по перевезенню продукції (вантажів), виходячи із багатокритеріальної оцінки за показниками роботи автомобілів.

Висновки

Запропоновано і продемонстровано реалізацію підходу до вибору автотранспортних засобів для вантажоперевезень на основі багатокритеріальної оцінки їх роботи. Використання даного методу на основі визначення відстані до цілі надає можливість комплексно враховувати техніко-економічні та експлуатаційні показники різних типів автотранспортних засобів, що значно підвищує ефективність ухвалення рішень по використанню автотранспортних засобів.

Результати даного дослідження свідчать, що запропонований підхід може бути ефективно застосований в різних сферах використання автотранспортних засобів для вантажоперевезень, що сприяє зниженню витрат, раціоналізації і оптимізації перевезень та підвищенню загальної ефективності транспортних процесів у виробничій сфері.

Впровадження запропонованої методики дозволяє ухвалювати обґрунтовані рішення щодо підбору автотранспорту для вантажоперевезень з метою раціонального використанню ресурсів в умовах сталого розвитку.

Список використаної літератури

1. Karayalcin, C., Pintea, M. The role of productivity, transportation costs, and barriers to intersectoral mobility in structural transformation. Economic Modelling. 2022. Vol. 108, P. 105759. https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105759

2. Sied, Abu. A Study on Essential of Effective Transportation System for Supply Chain Efficiency, Cost Reduction and Enhancing Customer Satisfaction. *Global Scientific Journal*. 2022. Vol. 12 (5). P. 8–13. https://doi.org/10.5281/zenodo.11124157

3. Лебединська О., Волченко А. Підвищення ефективності транспортно-логістичних процесів у підприємствах АПК. *Галицький економічний вісник*. 2019. Том 61. Вип. 6. С. 96–103.

4. Соларьов О.О., Таценко О.В., Волошко Т.П. Критерії вибору транспортних засобів для перевезення вантажів. *Комунальне господарство міст*. 2022. Вип. 6(173). С. 189–194. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-189-194

5. Поляков А.П., Галущак О.О., Галущак Д.О., Грабенко М.Д. Методика вибору рухомого складу, маршруту і графіка перевезення вантажів. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2011. Вип. 3. С. 1–10.

6. Івченко Р.А., Купін А.І. Дослідження методів багатокритеріальної оптимізації для вибору обладнання або деталей на виробництві. *Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32(71), Ч. 1, Вип. 1. С. 67–72. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-1/11

7. Stoilova, S. Methodology for Multi-criteria Selection of Transportation Technology in Transport Network. In: Sładkowski, A. (eds) Modelling of the Interaction of the Different Vehicles and Various Transport Modes. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham*. 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11512-8_1

8. Kresnanto, N.C., Putri, W.H., Lantarsih, R., & Harjiyatni, F.R. Efficient agri food supply chain in a sustainable transportation perspective. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 892(1), P. 012105. https://doi.org/10.1088/1755-1315/892/1/012105

9. De Oliveira, A.L.R., Marsola, K.B., Milanez, A.P., Fatoretto, S.L.R. Performance evaluation of agricultural commodity logistics from a sustainability perspective. *Case Studies on Transport Policy*. 2022. Vol. 10(1). P. 674–685. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.01.029

10. Основи інженерного менеджменту: навч. посіб. / І.І.Мельник, та ін.; за заг. ред. І.І.Мельника. Київ : Вища освіта, 2006. 525 с.

References

1. Karayalcin, C., Pintea, M. (2022). The role of productivity, transportation costs, and barriers to intersectoral mobility in structural transformation. *Economic Modelling*. 2022. Vol. 108, P. 105759. https://doi.org/10.1016/j.econmod.2022.105759

2. Sied, Abu. (2022). A Study on Essential of Effective Transportation System for Supply Chain Efficiency, Cost Reduction and Enhancing Customer Satisfaction. *Global Scientific Journal*, 12(5), 8–13. https://doi.org/10.5281/zenodo.11124157

3. Lebedynska, O., Volchenko, A. (2019) Increasing the logistics processes efficiency atagribusiness enterprises. *Galician economic journal*, 61(6), 96–103.

4. Solarov, O., Tatsenko, O., Voloshko, T. (2022). Criteria for choosing vehicles for transportation. *Municipal Economy of Cities*, 6(173), 189–194. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2022-6-173-189-194

5. Poliakov, A., Galuschak, O., Galuschak, D., Grabenko, M. (2011). Methods for choosing the rolling stock, route and schedule for cargo transportation. *Scientific works of Vinnytsia National Technical University*, 3, 1–10.

6. Ivchenko, R., Kupin, A. (2021). Research of multicriteria optimization methods for selection of equipment or parts in production. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 32(71), 1, 67–72. https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.1-1/11

7. Stoilova, S. (2020). Methodology for Multi-criteria Selection of Transportation Technology in Transport Network. In: Sładkowski, A. (eds) Modelling of the Interaction of the Different Vehicles and Various Transport Modes. *Lecture Notes in Intelligent Transportation and Infrastructure. Springer, Cham*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11512-8_1

8. Kresnanto, N.C., Putri, W.H., Lantarsih, R., & Harjiyatni, F.R. (2021). Efficient agri food supply chain in a sustainable transportation perspective. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 892(1), 012105. https://doi.org/10.1088/1755-1315/892/1/012105

9. De Oliveira, A.L.R., Marsola, K.B., Milanez, A.P., & Fatoretto, S.L.R. (2022). Performance evaluation of agricultural commodity logistics from a sustainability perspective. *Case Studies on Transport Policy*, 10(1), 674–685. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.01.029

10. Melnyk, I.I., Tyvonenko, I.H., Fryshev, S.H., Babii, V.P., Bondar, S.M. (2006). *Osnovy inzhenernoho menedzhmentu: navch. posib*. [Principles of Engineering Management: Textbook]. Kyiv : Vyshcha osvita, 2006. 525 p.

УДК 665.58 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.28

Л. В. САЛЄБА
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри хімічних технологій, експертизи
та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8290-4163

РОЗРОБКА СКЛАДУ КОСМЕТИЧНОЇ МАСКИ ДЛЯ ОБЛИЧЧЯ

Косметичні маски – це популярний засіб догляду за шкірою обличчя, який вирізняється більш вираженим впливом на структуру шкіри порівняно з кремами, лосьйонами чи гелями. Вони ефективно допомагають розв'язувати різноманітні проблеми шкіри завдяки активним компонентам, які мають як косметологічну, так і лікувальну дію. Кожна маска розроблена з урахуванням конкретного завдання, і її склад ретельно підібрано для досягнення бажаного результату. Косметичні маски можна класифікувати за кількома критеріями: типом шкіри, цільовим призначенням, впливом на шкіру, областю нанесення та текстурою.

Зростання обізнаності споживачів косметичних засобів про вплив різноманітних інгредієнтів на здоров'я шкіри, а також занепокоєння щодо подразнення, алергічних реакцій, наявності вугрів, пігментних плям та зморшок спонукає до зростання попиту на натуральні маски для обличчя.

В роботі проведено дослідження рецептури сумішевої косметичної маски на основі мінеральної глини із застосуванням лікарських рослин і структуроутворювача та визначено її органолептичні та сенсорні властивості. Показано, що наявність високого вмісту поліфенолів – розмаринової кислоти, похідних флавону надає шавлії лікарській антиоксидантних і протизапальних властивостей. Маска на основі каоліну звужує пори, усуває запалення, відбілює шкіру і робить тон обличчя рівним. Для створення гелеподібної структури, що подовжить тривалість утримування маски на обличчі без негативних ефектів сухості і обсипання запропоновано використання альгінату натрію. Гідрогелі забезпечують високу ефективність доставки активних інгредієнтів у шкіру. У результаті проведених випробувань було опрацьовано кінцеву рецептуру косметичної маски, яка складається із суміші трави шавлії з косметичною глиною 1 : 9 і гелевої основи із альгінату натрію концентрацією 3 %. Суміш сухих компонентів змішують з гелевою основою безпосередньо перед нанесенням у співвідношенні 1 : 3. Косметична маска, протестована в цьому дослідженні, ефективно очищує шкіру від жиру, підсушує, знімає подразнення, сприяє вирівнюванню тону шкіри.

Ключові слова: *косметичні маски для обличчя, маски, що змиваються, мінеральна глина, листя шавлії, органолептичні показники.*

L. V. SALEBA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Chemical Technologies, Expertise
and Provisions Production Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8290-4163

COMPOSITION DEVELOPMENT OF THE COSMETIC FACE MASK

Cosmetic masks are a popular facial skin care product that has a more pronounced effect on the skin structure compared to creams, lotions or gels. They effectively help solve various skin problems thanks to active ingredients that have both cosmetic and therapeutic effects. Each mask is designed with a specific task in mind, and its composition is carefully selected to achieve the desired result. Cosmetic masks can be classified according to several criteria: skin type, intended purpose, effect on the skin, area of application and texture.

The growing awareness of cosmetic consumers about the impact of various ingredients on skin health, as well as concerns about irritation, allergic reactions, the presence of acne, age spots and wrinkles, is driving the demand for natural face masks.

The work conducted a study of the formulation of a mixed cosmetic mask based on mineral clay with the use of medicinal plants and a structure-forming agent and determined its organoleptic and sensory properties. It was shown that the presence of a high content of polyphenols – rosmarinic acid, flavone derivatives gives Salvia officinalis L. antioxidant and anti-inflammatory properties. A mask based on kaolin narrows pores, eliminates inflammation, whitens the skin and makes the face tone even. To create a gel-like structure that will extend the duration of keeping the mask on the face without the negative effects of dryness and peeling, the use of sodium alginate was proposed. Hydrogels provide high efficiency in delivering active ingredients to the skin. As a result of the tests, the final formulation of a cosmetic mask was developed, which consists of a mixture of sage herb with cosmetic clay 1:9 and a gel base with sodium alginate with a concentration of 3 %. The mixture of dry ingredients is mixed with the gel base immediately before application in a ratio

of 1:3. The cosmetic mask tested in this study effectively cleanses the skin of oil, dries it, relieves irritation, encouraging an even skin tone.

Key words: *face beauty masks, rinse-off masks, mineral clay, salvia leaves, organoleptic indicators.*

Постановка проблеми

Косметичні маски це популярний косметичний засіб догляду за шкірою обличчя, що характеризується більш інтенсивною дією на структури шкіри у порівнянні з косметичним кремом, лосьйоном або гелем, та здатний виконувати косметичне і/або лікувальне призначення. Їх класифікують за різними ознаками: за косметичною або дерматокосметичною дією, вмістом основної функціональної речовини, тривалістю аплікації, місцем застосування, методом і складністю нанесення та змивання, типом шкіри, формою випуску та ін. [1]. Місце нанесення визначає реологічні властивості маски, це може бути в'язкий гель, паста або густа емульсія. В залежності від необхідності косметичні маски можуть бути частиною косметичних процедур у салоні після масажу, вапоризації, гарячого компресу або використовуватися в домашніх умовах для очищування, знежирювання, підсушування, пілінгу, вибілювання, підвищення тонусу шкіри, живлення та ін. Існують різні типи масок для обличчя за методом нанесення, такі як листова маска, маска-пілінг, гідрогелева та змивна маска. Оскільки косметичним завданням маски є швидке глибоке зволоження шкіри, то часто використовують у їх основі гідрогелі.

Виробники намагаються розробити індивідуальний підхід до кожного типу шкіри, використовують для нових формул біотехнології і наночастинки, що дозволяють створювати маски з більш глибоким і тривалим ефектом.

Рецептури косметичних масок для обличчя оновлюються за рахунок введення інноваційних інгредієнтів, найчастіше рослинного походження, які є м'якими, біологічно розкладаються і мають низький профіль токсичності. Сьогодні споживачі косметичних засобів прагнуть використовувати органічну продукцію, тому значно виріс попит на застосування у масках натуральних інгредієнтів, таких як продукти бджільництва, деревне вугілля, зелений чай матча, різноманітні активні інгредієнти рослинного походження (екстракти лікарських рослин, ефірні олії, сік алое та ін.).

Крім того, сталий розвиток і обізнаність про дію на навколишнє середовище впливають на рішення щодо типу матеріалів і активних інгредієнтів, які використовуються для виготовлення косметичних масок для обличчя [2]. Біорозкладні продукти стають все більш популярними.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Природні глинисті мінерали відіграють вирішальну роль у косметичних рецептах, пропонуючи унікальні мінеральні композиції та структурні характеристики для задоволення потреб у догляді за шкірою, для усунення подразнення шкіри або іншої внутрішньої детоксикації. Мінерали глини широко використовуються в дерматологічних клініках і курортах завдяки своїм корисним властивостям, відсутності додаткової обробки, як недорогий, ефективний і безпечний спосіб виведення токсинів із організму людини.

Глиняні маски – засіб для догляду за шкірою, відомий своєю здатністю глибоко очищати шкіру, усувати закупорку пор, знімати запальні процеси та надавати шкірі матовості. Зазвичай вони складаються з різних видів багатих на мінерали глин, таких як монтморилоніт, каолін, бентоніт, мароканська расул, французька зелена глина, і видаляють з поверхні шкіри забруднення, надлишок жиру і токсини. Ідеальні для людей з жирною або комбінованою шкірою. Вони також можуть бути корисними для тих, хто схильний до акне, оскільки допомагають очистити пори і запобігти висипанням. Крім того, глиняні маски забезпечують м'яке відлущування, сприяючи більш гладкій шкірі та рівному кольору обличчя [3].

Гідрогелі часто обирають як інгредієнти масок для обличчя через гідрофільну основу, що забезпечує високу ефективність доставки активних інгредієнтів у шкіру, здатність контролювати температуру шкіри та підвищувати фізіологічну активність [4]. Альгінатні маски мають велику популярність, оскільки здатні зв'язувати велику кількість молекул води, утворюючі гелеподібний склад, зручні у нанесенні та еластичні.

У дерматокосметології часто використовують рослинні косметичні маски або фітомаски, що характерні для традиційної китайської медицини. Вони являють собою суміш висушеної тонкоподрібненої лікарської рослинної сировини, яку самостійно чи з вмістом неорганічних наповнювачів, безпосередньо перед застосуванням, змішують з кремовою або гелевою основою і наносять на шкіру обличчя на деякий час.

Зростання обізнаності споживачів косметичних засобів про вплив різноманітних інгредієнтів на здоров'я шкіри, а також занепокоєння щодо подразнення, алергічних реакцій, наявності вугрів, пігментних плям та зморшок спонукає до зростання попиту на натуральні маски для обличчя.

Формулювання мети дослідження

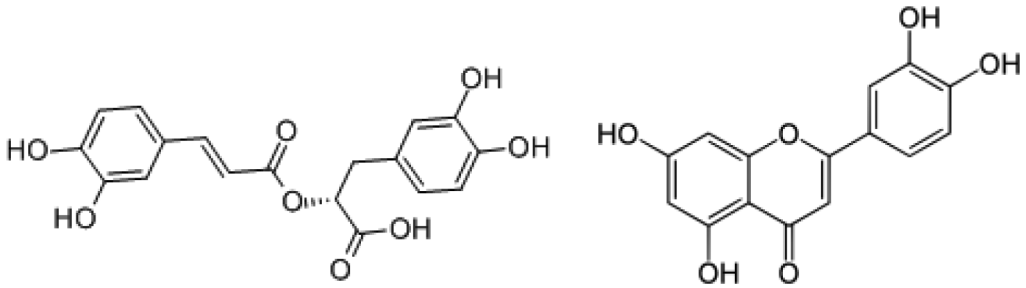
Враховуючи популярність такого косметичного засобу актуальними є роботи пов'язані із дослідженням оптимальних концентрацій інгредієнтів у масках, введення до складу косметичних масок препаратів рослинного походження.

Метою цієї роботи було розробити рецептуру сумішевої косметичної маски із застосуванням мінеральної глини, лікарських рослин і структуроутворювача та дослідити її органолептичні та сенсорні властивості.

Викладення основного матеріалу дослідження

При розробці рецептури сумішевої маски для обличчя в якості основи-носія було обрано альгінат натрію, який створює необхідну гелеву структуру косметичної маски. Також до рецептури вводили косметичну глину, а саме білу глину. Маска на основі каоліну або білої глини (*Kaolin*, *Kaolin clay*) звужує пори, усуває запалення, відбілює шкіру і робить тон обличчя рівним. Частинки алюмінію, які є у складі глини допомагають позбавитись прищів. Марганець, магній, мідь і цинк мають знезаражувальні властивості і стимулюють вироблення кератину. У рецептурі масок можуть бути використані і інші типи глин, які відрізняються мінеральним складом. Наприклад, блакитна глина має в основі мінерал каолініт з такими компонентами, як кадмій і кобальт, які надають їй блакитний відтінок. До складу також може входити срібло, що сприяє швидкому загоєнню дрібних ранок, тому така глина підходить для чутливої шкіри [3].

Серед різноманітної лікарської сировини, що може використовуватися у косметичних засобах, було обрано подрібнене листя шавлії. Шавлія лікарська (*Salvia officinalis L.*) має протизапальну, кровоспинну, ранозагоювальну, в'яжучу дію, виражені антисептичні властивості. Листя шавлії допомагає від прищів, вугрів, гнійничкових захворювань шкіри, лікує себорейні дерматити. Завдяки високому вмісту вітамінів С і А, вважається омолоджувальним засобом, знімає запалення та лікує грибкові ураження шкіри. Листя шавлії лікарської містять значну кількість гідроксикоричних кислот, флавонів, поліфенолів. Тритерпеноїди шавлії лікарської, представлені урсоловою та олеаноловою кислотами, чинять антиоксидантну, протизапальну, гепатопротекторну, протипухлинну й антимікробну дію. Антиоксидантні й протизапальні властивості сировини цієї рослини пояснюються, насамперед, високим вмістом поліфенолів – розмаринової кислоти (728,68–5340 мг/100 г сухої маси) (рис. 1, *а*), похідних флавону (рис. 1, *б*) тощо, які завдяки наявності трьох і більше гідроксильних груп у молекулі здатні інгібувати активні вільні радикали [5].



***а* розмаринова кислота** ***б* лютеолін**

Рис. 1. Хімічна структура поліфенолів шавлії

При розробці складу косметичної маски використовували суміш подрібненого листя шавлії з додаванням білої глини для надання підсушувальної дії у співвідношенні 1 : 9. Таке співвідношення компонентів дозволяє використати корисні інгредієнти кожного без втрати необхідної консистенції маски під час її нанесення. Результати застосування глиняної маски із вмістом листя шавлії свідчать про відсутність почервоніння, подразнення під час тривалого використання і легкий скрабуючий ефект. Недоліком використання суміші є здатність маски до обсипання під час висихання протягом 10–15 хвилин в залежності від товщини нанесеного шару.

Оскільки маски з мінеральної глини при висиханні за час аплікації стягують шкіру обличчя, можуть осипатися і при змиванні потребують витрати великої кількості води, в роботі було запропоновано використання плівкоутворювача, для створення гелеподібної структури, що подовжить тривалість утримування маски на обличчі без негативних ефектів сухості і обсипання.

На наступному етапі дослідження проводили опрацювання кінцевого складу і вибір оптимального співвідношення сухих компонентів маски та основи-носія.

Під час вибору основи-носія у складі косметичної маски враховують особливості типу шкіри. Наприклад, для жирного типу шкіри найбільш чутливого до вугрового висипу, підходять гелеві маски. Кремові маски можуть закупорювати шкіру, тоді як маски, що відриваються, можуть викликати подразнення, тканинні маски для жирної шкіри можуть збільшити кількість бактерій на поверхні шкіри. В даній роботі використовували альгінат натрію (*Sodium alginate*) концентрацією від 1 до 3 %.

Альгінати Е403, Е404, Е401, Е402 – амонієві, кальцієві, натрієві, калієві солі альгінової кислоти – природні гелеутворювачі, які у певній концентрації утворюють гідрогелі у воді у середовищі близько pH 7,0. Їх використовують як емульгатори, згущувачі у засобах для догляду за шкірою – захисних кремах, лосьйонах, як інгредієнти-кондиціонери у шампунях, у засобах для завивання, засобах, які надають додатковий об'єм волоссю, як згущувачі у зубних пастах, як стабілізатори у багатьох продуктах харчування, а також широко використовують для альгінатної косметики – альгінатних масок. Використання альгінатів натрію у різних технологіях залежить від їх

молекулярної маси і відповідно необхідної в'язкості. Для подальших дослідів у сумішах із косметичною глиною обрали концентрацію альгінату натрію 3 %.

Порошкову суміш із глини і подрібненого листя шавлії із гелевою основою змішують безпосередньо перед нанесенням маски на шкіру. Для визначення оптимального співвідношення інгредієнтів для змішування проводили досліди із такими пропорціями суха суміш : гелева основа – 1 : 1; 1 : 2; 1 : 3. Отримані зразки оцінювали візуально (однорідність, консистенція), а також визначали споживчі властивості (легкість нанесення на шкіру і змивання водою, відсутність дискомфорту під час витримування маски протягом 15 хв. і після нанесення). Результати випробувань наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Характеристика зразків косметичних масок

Співвідношення суха суміш : основа	Органолептичні показники		Споживчі показники		
	консистенція	однорідність	легкість нанесення і змивання	відчуття під час нанесення	відчуття після нанесення
1 : 1	дуже густа липка маса	+	-	-	-
1 : 2	густа в'язка маса	+	-	-	+
1 : 3	пластична маса	+	+	+	+

Таблиця 2

Органолептичні характеристики косметичної маски

Назва показника	Характеристика
Зовнішній вигляд	Однорідна маса з вмістом подрібненої рослинної сировини
Колір	Колір властивий кольору глини з вкрапленнями частинок листя шавлії
Запах	Властивий запаху речовин, що входять до складу
Водневий показник (pH)	8,5 (глиняної маски)

Результати досліджень органолептичних і споживчих властивостей досліджуваних зразків показали, що оптимальне співвідношення сухих компонентів і основи для безпосереднього нанесення на шкіру становить 1 : 3.

Важливим аспектом косметичних продуктів є відчуття, які вони залишають після нанесення, адже без сенсорного сприйняття неможливо повноцінно оцінити косметичний засіб.

Всі виготовлені зразки мали однаковий білий колір і специфічний запах, характерний для листя шавлії. Випробування часу висихання проводили шляхом спостереження за часом, необхідним для висихання косметичної маски, починаючи від нанесення на шкіру обличчя до утворення сухого шару. Час висихання знаходився у межах 14–16 хвилин. Залишення маски на обличчі на довший час не покращує її косметичний ефект, але може спричинити стягування і подразнення шкіри. Відомо, що природний pH шкіри людини коливається в межах від 4,5 до 5,5, при цьому для сухої шкіри він трохи нижчий 3,5, для жирної – дещо вищий 6,5. pH косметичних продуктів важливо регулювати, щоб зменшити подразнення шкіри. Кислотність отриманих зразків сумішевих косметичних масок знаходилась у межах 5,5–7,0 і залежала від співвідношення суха суміш : основа.

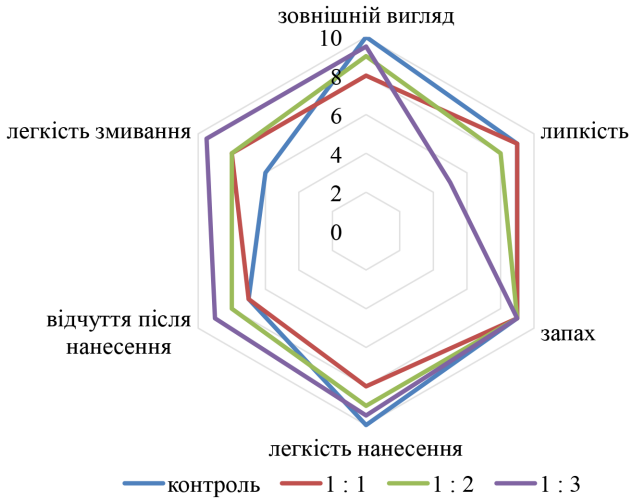


Рис. 2. Сенсорні профілі зразків косметичної маски для обличчя

Серед досліджених зразків масок, представлених на рис. 2 найкращим за консистенцією і сенсорними показниками виявився варіант зі співвідношенням суха суміш : гелева основа – 1 : 3. Це пластична маса, яка легко наноситься на шкіру обличчя, під час висихання створює гелеподібну дискретну плівку, що дозволяє активним інгредієнтам краще проникати до структур шкіри. Після застосування легко змивається і залишає приємні відчуття.

Слід зазначити, що на структурно-механічні показники альгінатних гелів впливають такі чинники, як температура, pH, наявність інших рецептурних компонентів. Тому потребує додаткового дослідження зв'язок між концентрацією компонентів, їх співвідношенням і структурно-механічними властивостями та стабільністю гелів.

Висновки

У результаті проведених випробувань було опрацьовано кінцеву рецептуру косметичної маски, яка складається із суміші трави шавлії з косметичною глиною 1 : 9 і гелевої основи із альгінату натрію концентрацією 3 %. Суміш сухих компонентів змішують з гелевою основою безпосередньо перед нанесенням у співвідношенні 1 : 3. Проведено визначення органолептичних і споживчих показників якості косметичної маски. Результати використання маски із вмістом листя шавлії свідчать про відсутність почервоніння і подразнення, шкіра підсушується, очищується від жиру, набуває матовості.

Регулярне використання масок для обличчя допомагає вирішувати поширені проблеми шкіри, такі як висипання, чорні точки, вугрі, жирний блиск і нерівномірний тон, підтримує її здоровий вигляд і сприяє уповільненню процесів старіння.

Список використаної літератури

1. Федоровська, М., Ярема, І., Кашуба, А., Салієва, Л. Розробка складу і технології лікарської косметичної маски з рослинними компонентами. *Проблеми хімії та сталого розвитку*. 2023. № 1. С. 36–46. https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-5

2. Morganti P., Morganti G., Chen H.D., Gagliardini A. Beauty mask: market and environment. *Journal of Clinical and Cosmetic Dermatology*. 2019. Vol. 3(2). P. 1–10. https://dx.doi.org/10.16966/2576-2826.141

3. Косметичні глини: види, властивості та способи застосування. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.woodandsoap.in.ua/uk/statti/kosmetychni-hlyny-vydy-vlastyvosti-ta-sposoby-zastosuvannya

4. Anakha Narayanan, Fahidha K.S., Godwin Babu, Nandana V., Raji M.K., et al. Formulation and evaluation of skin invigorating caffeine face mask. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*. 2022. Vol. 75(2). – P. 86–89. http://dx.doi.org/10.47583/ijpsrr.2022.v75i02.014

5. Гудзь, Н.І., Шанайда, М.І., Дармограй, Р.Є. Шавлія лікарська (Salvia officinalis L.): перспективи використання сировини як джерела рослинних препаратів антиоксидантної та антимікробної дії. *Вісник фармації*. 2020. № 2(100). С. 11–18. https://doi.org/10.24959/nphj.20.27

References

1. Fedorovska, M., Yarema, I., Kashuba, A., Saliieva, L. (2023). Rozrobka skladu i tekhnolohii likarskoi kosmetychnoi masky z roslynnymy komponentamy [Composition and technology development of the medicinal cosmetic mask with herbal ingredients]. *Problemy khimii ta staloho rozvytku – Problems of Chemistry and Sustainable Development*, 1, 36–46. https://doi.org/10.32782/pcsd-2023-1-5 [in Ukrainian].

2. Morganti P., Morganti G., Chen H.D., Gagliardini A (2019) Beauty Mask: Market and Environment. *J. Clin Cosmet Dermatol* 3(2): dx.doi.org/10.16966/2576-2826.141 [in English].

3. Kosmetychni hlyny: vydy, vlastyvosti ta sposoby zastosuvannia. [Cosmetic clays: types, properties and methods of application]. (n.d.). Retrieved from https://www.woodandsoap.in.ua/uk/statti/kosmetychni-hlyny-vydy-vlastyvosti-ta-sposoby-zastosuvannya [in Ukrainian].

4. Anakha Narayanan, Fahidha K.S., Godwin Babu, Nandana V., Raji M.K. et al. (2022). Formulation and evaluation of skin invigorating caffeine face mask. *International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research*, 75(2), 86–89. http://dx.doi.org/10.47583/ijpsrr.2022.v75i02.014 [in English].

5. Hudz, N.I., Shanaida, M.I., Darmohrai, R.Ye. (2020). Shavliia likarska (Salvia officinalis L.): perspektyvy vykorystannia syrovyny yak dzherela roslynnykh preparativ antyoksydantnoi ta antymikrobnoi dii [Salvia offcinalis L.: prospects of using the raw material as a source of herbal medicines with the antioxidant and antimicrobic activity]. *Visnyk farmatsii – News of Pharmacy*, 2(100), 11–18. https://doi.org/10.24959/nphj.20.27 [in Ukrainian].

УДК 656.13 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.29

О. В. СТЕПАНОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри тракторів і автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

І. Ю. КОБЗАР
асистент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0009-0004-1778-9463

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

Експлуатацію вантажного автотранспорту в цілому можна прийняти як комплексну систему інженерно-технічних та організаційних заходів та розглядати у двох взаємозалежних напрямках. По-перше, забезпечення працездатного стану вантажного автотранспорту (технічна експлуатація). По друге, ефективне використання вантажного автотранспорту, що знаходяться в працездатному стані (виробнича експлуатація). При цьому під працездатністю розуміється властивість вантажного автотранспорту, при якій значення всіх параметрів, що характеризують його здатність виконувати задані функції, відповідають вимогам нормативно-технічної та конструкторської документації. Зокрема, технічна експлуатація припускає використання вантажного автотранспорту за його призначенням. Метою дослідження є розгляд формалізації процесів технічної експлуатації вантажного автотранспорту. З'ясовано, що експлуатаційні фактори знижують працездатність вантажного автотранспорту і тим самим впливають на зміну показників надійності. Унаслідок цього спостерігається зниження продуктивності та потужності вантажного автотранспорту, зменшення ймовірності його безвідмовної роботи й безпеки. Тобто технічний стан і вихідні характеристики вантажного автотранспорту залежать від ступеня негативного впливу на кожну з цих систем експлуатаційних факторів. Доведено, що вантажний автотранспорт являє собою складну технічну систему, яка складається з ряду функціонально об'єднаних систем. Для забезпечення надійності вантажного автотранспорту протягом установленого заводом-виробником ресурсу при технічному обслуговуванні особливу увагу пропонується приділяти паралельно-допоміжним системам. При цьому до періодичності обслуговування паралельно-допоміжних систем необхідно додати періодичність обслуговування послідовно-допоміжних систем. Відповідно, надійність та довговічність складної технічної системи буде визначатися якістю функціонування.

Ключові слова: *вантажний автотранспорт, технічна експлуатація, працездатний стан, експлуатаційні фактори, технічна система.*

O. V. STEPANOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532

I. YU. KOBZAR
Assistant at the Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture
ORCID: 0009-0004-1778-9463

FORMALIZATION OF THE PROCESSES OF TECHNICAL OPERATION OF FREIGHT VEHICLES

The operation of freight vehicles can be generally accepted as a comprehensive system of engineering, technical and organizational measures and can be considered in two interdependent areas. Firstly, ensuring the serviceable condition of freight vehicles (technical operation). Secondly, the efficient use of freight vehicles that are in good working order (production operation). In this case, operability means the property of freight vehicles in which the values of all parameters characterizing its ability to perform the specified functions meet the requirements of regulatory, technical and design documentation. In particular, technical operation involves the use of freight vehicles for their intended purpose. The aim of the study is to consider the formalization of the processes of technical operation of freight vehicles. It has been found that operational factors reduce the efficiency of freight vehicles and thereby affect changes

in reliability indicators. As a result, there is a decrease in the productivity and capacity of freight transport, a decrease in the probability of its trouble-free operation and safety. That is, the technical condition and performance characteristics of freight vehicles depend on the degree of negative impact of operational factors on each of these systems. It is proved that freight vehicles are a complex technical system consisting of a number of functionally integrated systems. In order to ensure the reliability of freight vehicles during the service life established by the manufacturer, it is proposed to pay special attention to parallel and auxiliary systems during maintenance. At the same time, the frequency of maintenance of parallel-auxiliary systems should be added to the frequency of maintenance of series-auxiliary systems. Accordingly, the reliability and durability of a complex technical system will be determined by the quality of its operation.

Key words: *freight vehicles, technical operation, serviceable condition, operational factors, technical system.*

Постановка проблеми

Експлуатацію вантажного автотранспорту (надалі – автотранспорт) можна розглядати як комплексну систему, що включає інженерно-технічні та організаційні заходи. Її можна поділити на два взаємопов'язані напрямки. Перший – це забезпечення працездатного стану автотранспорту, тобто його використання за призначенням (технічна експлуатація). Другий – це ефективне використання транспорту, що перебуває в працездатному стані (виробнича експлуатація) [7].

Основною метою цих напрямків є досягнення максимальної ефективності використання автотранспорту, забезпечення високої продуктивності та безпеки. Важливим аспектом є також мінімізація часу простоїв під час технічного обслуговування і ремонту.

Окрім цього, необхідно зберігати робочі властивості автотранспорту, щоб усі параметри, що характеризують його здатність виконувати заплановані функції, відповідали вимогам нормативно-технічної та конструкторської документації. Це дозволяє не лише продовжити термін експлуатації автотранспорту, але й знизити витрати на його обслуговування та ремонти, що є важливим фактором для зниження загальних витрат на підприємствах, які використовують вантажні автомобілі. Таким чином, основою для досягнення високої ефективності та економічності використання автотранспорту є системний підхід до організації та управління процесами технічної експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основним принципам працездатності транспортних засобів присвячені різнопланові роботи В. Я. Аніловича, А. В. Бажинова, Н. Я. Говорущенка, А. С. Грінченка, І. Є. Дюміна, М. А. Єлизаветина, А. І. Ісаєва, О. П. Кравченка, І. В. Крагельського, Є. С. Кузнєцова, Р. В. Кугеля, В. Г., А. Т. Лебедєва, А. А. Мельниченка, Л. В. Назарова, М. А. Подригадо, А. С. Полянського, О. В. Петрова, А. І. Петренка, В. Н. Ткачова, М. С. Шевченка й ін. Науковцями доведено, що основою стратегії технічної експлуатації є вибір оптимальних режимів роботи, термінів і обсягів технічних впливів, зважаючи на реальний технічний стан автотранспорту. Зокрема, було розглянуто стратегію технічного обслуговування і ремонту (ТОР) автотранспорту, яка включає три види робіт: обов'язкові, контрольно-діагностичні та усунення виявлених несправностей [2, 6–8]. Зазначено, що з удосконаленням методів і засобів технічної діагностики обсяг обов'язкових робіт можна зменшувати. У цій системі обов'язкові роботи та діагностика плануються, а усунення поступових відмов носить попереджувальний характер.

Дослідженнями доведено, що для забезпечення нормального зношування деталей автотранспорту необхідно регулярно та вчасно замінювати мастильні матеріали в його вузлах і агрегатах [8]. При цьому періодичність заміни мастила для різних вузлів та агрегатів може бути різною, оскільки це залежить від їх конструктивних особливостей, навантажень, тривалості і частоти впливу, температурних умов роботи та інших чинників. Тому деякі вузли потребують частішої заміни мастильного матеріалу, а інші – рідше. Визначити оптимальний інтервал заміни мастила можна за допомогою математичного або імітаційного моделювання, а також через експериментальні дослідження. Зокрема, експериментальний метод дозволяє виявити моменти, коли мастильний матеріал втрачає свої фізико-хімічні властивості.

Роботи, що входять до складу контрольно-виконавчої системи ТОР, поділяються на дві частини: контрольно-діагностичну та виконавчу. Контрольно-діагностична частина виконується регулярно перед кожним типом ТОР згідно з періодичністю, визначеною заводськими нормативами [1, 3–5]. Виконавча частина робіт здійснюється за необхідності. В залежності від умов експлуатації транспорту, деякі профілактичні заходи можуть бути виключені зі стандартного списку та проводитись за потребою. Для цього на автопідприємствах слід впроваджувати лінії інструментального технічного контролю та інтегрувати в конструкції транспортних засобів засоби технічного діагностування [4].

Формулювання мети дослідження

Розглянути формалізацію процесів технічної експлуатації вантажного автотранспорту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відомо, що на автотранспорт та його вузли впливають різні зовнішні фактори експлуатації, такі як умови навколишнього середовища, характер навантаження, кваліфікація водія тощо. Ці фактори спричиняють внутрішні процеси, такі як зношування, деформація, старіння та втома, що веде до поступових змін фізико-механічних властивостей матеріалів деталей і вузлів автотранспорту, зокрема до зниження міцності, твердості та зносостійкості [10].

Експлуатаційні фактори знижують ефективність автотранспорту, що впливає на зміну його показників надійності. Це призводить до зниження продуктивності та потужності, зменшення ймовірності безвідмовної роботи та

безпеки транспорту. Також збільшуються витрати на ТОР, а також на зниження коефіцієнтів технічного використання й готовності.

Зовнішні експлуатаційні фактори негативно впливають на автотранспорт, викликаючи відмови та несправності, що призводить до зниження безпеки. Зміна технічного стану автотранспорту і його працездатності, в основному, залежить від швидкості зношування деталей у вузлах тертя. Тому для управління зміною технічного стану необхідно підтримувати оптимальну середню швидкість зношування з'єднаних деталей.

Для підтримки технічного стану автотранспорту необхідно здійснювати контрольно-діагностичні, регулювальні та кріпильні роботи, періодичність яких може варіюватися. Це зумовлює потребу в формуванні комплексів робіт в залежності від їх впливу на вузли, агрегати та системи транспорту, зокрема ТОР [9, 11].

Для формування комплексів робіт із ТОР пропонується розглядати автотранспорт як систему, що складається з кількох підсистем, кожна з яких має своє функціональне призначення. Вплив кожної з цих підсистем на загальну надійність автотранспорту варіюється [9]. Деякі агрегати, вузли та складальні одиниці, відмови яких виникають через досягнення граничного стану та в кінцевому підсумку призводять до відмови автотранспорту, можна віднести до основних систем, а їх відмови – до *відмов основних систем*.

Агрегати, вузли та складальні одиниці, відмови яких спричиняють зупинки в роботі автотранспорту та знижують ймовірність безвідмовної роботи й коефіцієнт готовності, можна віднести до категорії *послідовно-допоміжних систем*. Відмови цих систем не впливають на середній ресурс автотранспорту. До цієї категорії відносяться всі відмови, крім тих, що виникають через досягнення граничного стану основних систем. Наприклад, порушення регулювальних параметрів або пошкодження сальників тощо.

Допоміжні системи, відмови яких або порушення їх нормальної роботи призводять до прискореного зношування елементів основних систем, належать до *паралельно-допоміжних систем*. Відмови таких систем знижують середні ресурси основних систем і загальний ресурс автотранспорту. Прикладом є зниження фізико-хімічних властивостей мастила або нарощування абразивних частинок у мастильноу матеріалі [2].

Таким чином, автотранспорт можна розглядати як складну технічну систему, що складається з кількох функціонально пов'язаних підсистем. Надійність і довговічність цієї системи визначаються ефективністю роботи її основних (S_o), послідовно-допоміжних ($S_в$) і паралельно-допоміжних ($S_п$) систем. При цьому кожна з цих систем складається з певних структурних вузлів, таких як S_1 і S_2.

Технічний стан та характеристики автотранспорту залежать від того, як експлуатаційні фактори впливають на кожну з цих систем під час її використання за призначенням [6, 11]. Цей процес можна формалізувати через відповідну схему (рис. 1).

Для протидії негативному впливу експлуатаційних факторів необхідно впровадити відновлювальні технічні заходи, передбачені системою ТОР. Організація цих заходів ґрунтується на результатах контролю технічного стану автотранспорту за допомогою методів та засобів технічного діагностування.

Варто зауважити, що ймовірність відмови допоміжних систем протягом міжобслуговувального пробігу є дуже низькою. Тому їх відновлення на цей період не планується, і вони будуть обслуговуватися лише відповідно до встановленого графіка.

Може виникнути ситуація, коли маємо неодноразові відмови послідовно-допоміжних систем. В такому випадку буде необхідне кількаразове ($n > 1$) відновлення під час роботи між обслуговуваннями.

Паралельно-допоміжні системи взаємодіють із однією або кількома основними системами, або кілька паралельно-допоміжних систем забезпечують нормальну роботу однієї основної. Така функціональна взаємодія дозволяє розглядати паралельно-допоміжні системи як системи, що обслуговуються.

Багаторазове відновлення ефективності роботи цих систем протягом часу експлуатації вузлів автотранспорту та його основних систем здійснюється з певною періодичністю обслуговування, яка значно менша за ресурс автотранспорту ($t_{обсл.} < T_p$). Проте, слід враховувати, що відновлення ефективності роботи паралельних допоміжних систем має обслуговувальний характер як для всього автотранспорту, так і для його основних систем.

Для визначення важливості обслуговування паралельно-допоміжних систем у запропонованій системі ТОР застосовується методика оцінки та підтримки надійності автомобілів, що адаптована до специфічних умов експлуатації (рис. 2).

Для випадків, коли заміна мастильного матеріалу не проводиться взагалі, перетин кривої 1 з лінією $З_п$ визначає мінімальний ресурс сполучених деталей $t_{p\min}$, який аналітично може мати наступний вигляд

$$t_{p\min} = \left(\frac{З_п}{a} \right)^{I/a}, \qquad (1)$$

де $З_п$ – гранично допустиме зношування елемента; a – коефіцієнт, що характеризує швидкість зношування; I/α – показник ступеня, що відображає характер зношування.

Якщо заміну мастильного матеріалу проводити з періодичністю $t_{обс.і}$ (крива 2), то зміна зношування $\Delta З_i$, визначиться зі співвідношення

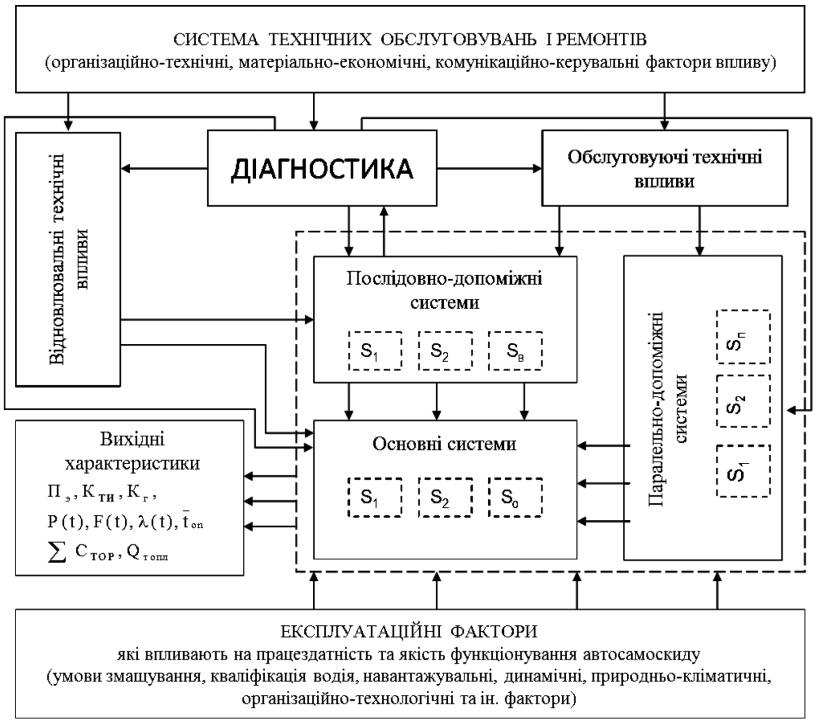


Рис. 1. Формалізована схема впливу різних факторів на технічний стан та вихідні характеристики автотранспорту [5]

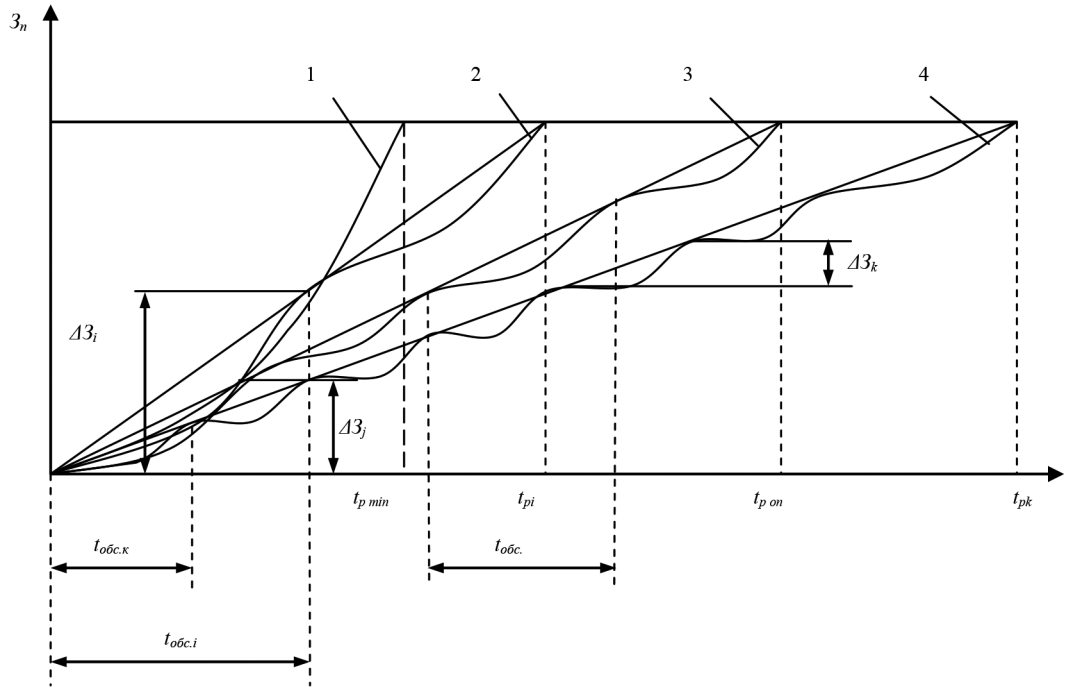


Рис. 2. Забезпечення ресурсів деталей і сполучень проведенням технічних обслуговувань паралельно-допоміжних систем у системі ТОР

$$\Delta З_i = a \cdot t_{обс.i}^{n}. \quad (2)$$

При цьому буде зберігатися велика швидкість зношування, що підтверджується великим приростом зношування $\Delta З_i$, а ресурс змащуваних деталей буде обмежений ресурсом t_{pi}, який більше $t_{p\min}$. Дана стратегія призводить до того, що витрати на заміну мастильного матеріалу будуть мінімальними, а витрати на ремонт збільшаться.

Отже, для збільшення ресурсу та забезпечення працездатності автотранспорту необхідно збільшити число обслуговувань паралельно-допоміжних систем, а значить, зменшити величину періодичність заміни мастильного

матеріалу $t_{обс}$. Однак, при досить малій величині періодичності обслуговування $t_{обсk}$ мастильний матеріал не буде виробляти свій ресурс, при цьому будуть мати місце зайві витрати на обслуговування. Своєю чергою, ця стратегія (крива 4) характеризується малою швидкістю зношування сполучених деталей, меншими витратами на ремонт і підвищеним ресурсом t_{pk}.

У запропонованій системі ТОР можна обрати будь-яку з розглянутих стратегій обслуговування залежно від фінансового становища та особливостей експлуатації автотранспорту. Найбільш оптимальною є стратегія, за якої періодичність обслуговування відповідає встановленому заводом-виробником ресурсу для з'єднань або деталей.

Графічний приклад такої стратегії можна представити кривою 3. У цій стратегії періодичність заміни мастильного матеріалу $t_{\text{обс.оп}}$ є оптимальною, тобто при цій періодичності витрати на проведення обслуговувань мінімальні при встановленому ресурсі.

Напрацювання $t_{p\,on}$, є ресурсом елемента при технічному обслуговуванні з періодичністю $t_{\text{обс. оп}}$. Кількість обслуговувань можна визначити діленням граничного зношування $З_n$ на величину зношування $\Delta З_i$.

$$t_{pi} = \frac{З_n}{\Delta З_i} \cdot t_{обсл.i}, \tag{3}$$

або з використанням співвідношення (3)

$$t_p = \frac{З_n}{a \cdot t^n_{обсл.i}} \cdot t_i = \frac{З_n}{a \cdot t^{n-1}_{обсл.i}}. \tag{4}$$

Технічне обслуговування основних систем автотранспорту зводиться до проведення діагностики, на основі якої можуть бути призначені відповідні відновлювальні заходи [9]. Такий підхід також може бути застосований до деяких послідовно-допоміжних систем. Відмова цих систем зазвичай носить випадковий характер. Для оцінки значущості обслуговування основних і послідовно-допоміжних систем пропонується використовувати показник надійності – інтенсивність відмов. Залежність зміни цієї інтенсивності від напрацювання показано на рис. 3.

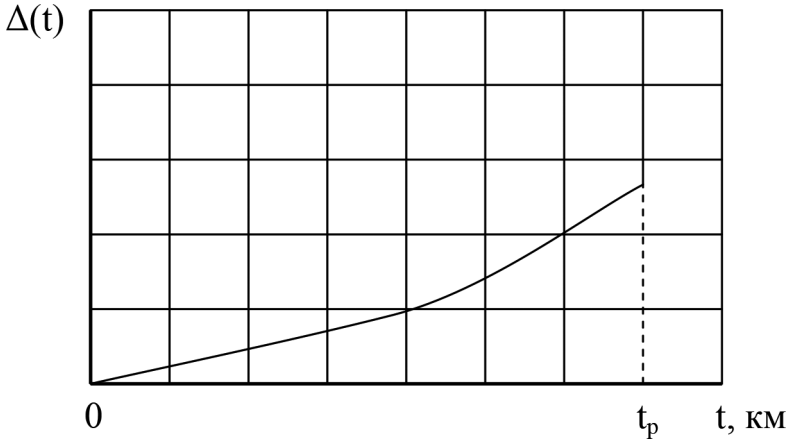


Рис. 3. Залежність зміни інтенсивності відмов послідовно-допоміжних і основних систем залежно від напрацювання

Очевидно, що інтенсивність відмов збільшується в міру збільшення напрацювання автосамоскида й аналітично може мати наступний вигляд

$$\lambda(t_i) = \frac{f(t_i)}{P(t_i)}, \tag{5}$$

де $f(t_i)$ – щільність ймовірностей; $P(t_i)$ – ймовірність безвідмовної роботи.

При цьому збільшуються витрати часу на усунення відмов, що призводить до зниження коефіцієнта технічного використання та коефіцієнта готовності, що, в свою чергу, зменшує рівень працездатності автотранспорту. Однак ці відмови не знижують ресурс окремих вузлів, агрегатів і автотранспорту в цілому, тому вони не впливають на зміну показників надійності.

Висновки

Визначення періодичності обслуговування деяких послідовно-допоміжних систем у порівнянні з паралельно-допоміжними системами є складним завданням. Неможливо передбачити, діагностувати або виявити заздалегідь такі відмови, як розрегулювання механізмів або появу протікань у системах автотранспорту. Ці відмови мають випадковий характер і щоразу вимагають зупинки транспортного засобу для усунення несправностей, тобто проведення позапланового ТОР.

У відміну від послідовно-допоміжних, відмови паралельно-допоміжних систем знижують показники надійності та довговічності. Для забезпечення надійної роботи автотранспорту протягом встановленого виробником ресурсу необхідно приділяти особливу увагу паралельно-допоміжним системам під час технічного обслуговування. Крім того, до періодичності обслуговування паралельно-допоміжних систем слід додавати бортове функціональне діагностування основних систем і обслуговування послідовно-допоміжних систем.

Запропоновані технологічні заходи допомагають зменшити швидкість зношування з'єднаних деталей автотранспорту та збільшити ресурс основних систем. Окрім того, ці заходи сприяють відновленню регулювальних параметрів послідовно-допоміжних систем, що значно підвищує безпеку транспорту і відкриває можливості для подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. ДСТУ 3650-97. Технічне обслуговування і ремонт автомобілів. Держстандарт України. Київ.
2. Мельниченко А. А. Технічне діагностування транспортних засобів: новітні методи і практичні аспекти. *Технічна механіка*, 2019. С. 92–101.
3. Про затвердження технологічних вимог до засобів перевірки технічного стану, обслуговування і ремонту колісного транспортного засобу. Наказ Міністерства Інфраструктури України від 15.02.2012. № 106.
4. Порядок проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 р. N 687 (редакція від 01.05.2022).
5. Про затвердження Порядку проведення технічного діагностування. Постанова Кабінету Міністрів України № 1078 від 11.11.2016.
6. Петренко А. І. Методи функціональної діагностики автотранспортних засобів. *Автомобільний транспорт*, 2020, № 3, С. 45–56.
7. Петров, О. В. Автотранспортні підприємства: Організація та управління технічним обслуговуванням. Київ : НТУ, 2011. 228 с.
8. Подригало М. А. Забезпечення надійності автотракторної техніки адаптивними методами технічного обслуговування та ремонту. *Автомобільний транспорт*. Зб. наук. тр. Вип. 4. Х. : ХДАДТУ, 2000. С. 49–51.
9. Степанов О. В., Волобуєва Т. В. Адаптивна система технічного обслуговування автотранспорту. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції 18–20 квітня 2024 року. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 129–132.
10. Степанов О. В. Чинники, що впливають на надійність вантажного автомобіля під час роботи на породних відвалах. *Автомобільний транспорт*. Випуск 36. № 13, 2003. С. 140–142.
11. Шевченко, М. С. Проблеми та перспективи розвитку систем технічного обслуговування транспортних засобів. К. : Техніка, 2010. 420 с.

References

1. DSTU 3650-97. Maintenance and repair of vehicles. State standard of Ukraine. Kyiv.
2. Melnichenko A. A. (2019).Technical diagnostics of vehicles: the latest methods and practical aspects. *Technical mechanics*. P. 92–101.
3. On approval of technological requirements for means of checking the technical condition, maintenance and repair of a wheeled vehicle. Order of the Ministry of Infrastructure of Ukraine of February 15, 2012. No. 106.
4. The Procedure for Technical Inspection, Testing and Expert Examination (Technical Diagnostics) of High Risk Machines, Mechanisms and Equipment. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of May 26, 2004, No. 687 (as amended on May 01, 2022).
5. On Approval of the Procedure for Technical Diagnostics. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 1078 of November 11, 2016.
6. Petrenko A. I. (2020). Methods of functional diagnostics of vehicles. *Automobile transport*. No. 3, P. 45–56.
7. Petrov O. V. (2011). Motor transport enterprises: Organization and management of maintenance. Kyiv : NTU. P. 228.
8. Podryhalo M. A. (2000).Ensuring the reliability of automotive and tractor equipment by adaptive methods of maintenance and repair. *Automobile transport*. Collection of scientific papers. Issue 4. Kh. : KhDADTU. P. 49–51.
9. Stepanov O. V., Volobueva T. V. (2024). Adaptive system of vehicle maintenance. *Automobile transport and infrastructure*. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference, April 18–20, 2024. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv. P. 129–132.
10. Stepanov O. V. (2003). Factors influencing the reliability of a truck during work on waste heaps. *Automobile transport*. Issue 36. No. 13, P. 140–142.
11. Shevchenko, M. S. (2010). Problems and prospects for the development of vehicle maintenance systems. K. : Technics. P. 420.

УДК 656.13 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.30

О. В. СТЕПАНОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри тракторів і автомобілів
Національний університет біоресурсів і природокористування України
ORCID: 0000-0003-4954-2532

В. М. МІНАКОВ
кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри машинобудування
Одеська державна академія будівництва та архітектури
ORCID: 0000-0002-6951-8399

ОЦІНКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

У статті надано оцінку працездатності вантажного автотранспорту. Відомо, що вантажний автотранспорт для визначення якості має певну групу експлуатаційних властивостей. До загальної експлуатаційної властивості належить працездатність. Метою статті є оцінка працездатності вантажного автотранспорту в технологічних умовах експлуатації. Визначено, що працездатність вантажного автотранспорту включає здатність виконувати поставлені завдання в транспортних та технологічних умовах експлуатації за умовами експлуатації й станом вантажного автотранспорту. Управління станом вантажного автотранспорту пов'язано з підтримкою його працездатності із забезпеченням безвідмовності. Транспортні умови експлуатації мають на увазі інтенсивність і щільність потоків вантажного автотранспорту при виконанні транспортно-технологічної операції. Технологічні умови експлуатації включають інтенсивність та щільність потоків вантажного автотранспорту при виконанні транспортно-технологічних операцій. Обґрунтовано, що експлуатаційні властивості вантажного автотранспорту залежать і від природно-кліматичних умов експлуатації, що мають на увазі навколишнє середовища як з погляду місцевості, так і атмосферно-кліматичних явищ. Зроблено висновок, що для комплексної оцінки працездатності вантажного автотранспорту в системі «автомобіль – місцевість» можна запропонувати критерій оптимальної реалізації режимів руху за балансом потужності, за керованістю та маневровістю в конкретних експлуатаційних умовах. При цьому надані критерії та розв'язання завдань, що мають безпосереднє відношення до підтримки працездатності вантажного автотранспорту при роботі в технологічному циклі, вказують на необхідність переходу на систему забезпечення працездатного стану вантажного автотранспорту в конкретних експлуатаційних умовах.

Ключові слова: *вантажний автотранспорт, працездатність, безвідмовність, умови експлуатації, технологічний цикл.*

O. V. STEPANOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Tractors and Cars
National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine
ORCID: 0000-0003-4954-2532

V. M. MINAKOV
Candidate of Economic Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Mechanical Engineering
Odesa State Academy of Building and Architecture
ORCID: 0000-0002-6951-8399

ASSESSMENT OF TRUCK PERFORMANCE

The article evaluates the performance of freight vehicles. It is known that freight vehicles have a certain group of operational properties for determining quality. The general operational property is operability. The aim of the study is to evaluate the operability of freight vehicles under technological operating conditions. It has been determined that the operability of freight vehicles includes the ability to perform tasks in transport and technological conditions of operation according to the operating conditions and condition of freight vehicles. The management of the condition of freight vehicles is associated with maintaining their performance and ensuring reliability. Transport operating conditions imply the intensity and density of freight traffic flows during a transport and technological operation. Technological operating conditions include the intensity and density of freight traffic flows in the performance of transport

and technological operations. It is substantiated that the operational properties of freight vehicles depend on the natural and climatic conditions of operation, which means the environment both in terms of terrain and atmospheric and climatic phenomena. It is concluded that for a comprehensive assessment of the mobility of freight vehicles in the vehicle-terrain system, it is possible to propose a criterion for the optimal implementation of traffic modes in terms of power balance, controllability and maneuverability in specific operating conditions. At the same time, the presented criteria and solutions to the tasks directly related to maintaining the efficiency of freight transport during operation in the technological cycle indicate the need to switch to a system for ensuring the efficient state of freight transport in specific operating conditions.

Key words: *freight transport, operability, reliability, operating conditions, technological cycle.*

Постановка проблеми

Кожен тип вантажного автотранспорту (надалі – автотранспорт) має певний набір експлуатаційних властивостей, які визначають його якість і значно впливають на безпеку. Основною експлуатаційною характеристикою є працездатність. Вона включає здатність автотранспорту виконувати завдання з максимальною адаптивністю до умов експлуатації та наявного технічного стану транспортного засобу. Тобто виконання транспортних операцій залежить від двох факторів: умов експлуатації та технічного стану автотранспорту. Своєю чергою, управління технічним станом автотранспорту полягає в підтриманні його працездатності, а ключовим аспектом цього процесу є забезпечення безвідмовної роботи.

Стан автотранспорту залежить від їхньої здатності зберігати працездатність, що включає можливість виконувати поставлені завдання в умовах технологічної експлуатації. При цьому експлуатаційні характеристики автотранспорту визначаються також природно-кліматичними умовами їх використання. Для всебічної оцінки працездатності автотранспорту в системі «автомобіль – місцевість» необхідно застосовувати критерії оптимального виконання режимів руху, враховуючи баланс потужності, керованість та маневровість у конкретних експлуатаційних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Розробці основних принципів забезпечення працездатності автотранспорту присвячені роботи О. В. Бажинова, І. М. Величкина, М. Я. Говорущенка, О. С. Гринченка, І. Е. Дюміна, А. І. Ісаєва, І. В. Крагельського, О. П. Кравченка, Є. С. Кузнецова, Р. В. Кугеля, А. Т. Лебедєва, В. М. Міхліна, В. В. Нічке, О. С. Пронікова, М. А. Подригало, В. Н. Ткачова, А. М. Шейніна й ін. Науковцями змодельовано стратегії забезпечення працездатності автотранспорту, що охоплюють такі елементи: парк машин, трудові ресурси, матеріальні ресурси, нормативну, технологічну документацію та їх взаємозв'язок тощо. Кожна з розроблених стратегій має свої види технічних заходів. Вони характеризуються періодичністю, тривалістю, трудомісткістю і складом робіт, що проводяться при певних видах впливів для забезпечення заданого рівня працездатності парку автотранспорту [1, 2, 4, 5, 7, 8–11, 12].

Попри наявності значної кількості загальних праць, суджень та думок, залишається недостатньо досліджень, що стосуються оцінки працездатності автотранспорту виконувати поставлені завдання в умовах технологічної експлуатації.

Формулювання мети дослідження

Надати оцінку працездатності вантажного автотранспорту в технологічних умовах експлуатації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Технологічні умови експлуатації автотранспорту охоплюють характеристики, такі як технічні умови автотранспорту та природно-кліматичні умови. Важливо також враховувати агресивність навколишнього середовища для конкретних умов експлуатації, а також дорожньо-транспортні умови, які поділяються на транспортні та дорожні. Останні характеризують поверхні руху [3].

Досліджуючи роботу автотранспорту з'ясовано, що експлуатаційні властивості залежать від взаємодії автотранспорту з покриттям проїжджої частини дороги [6]. При цьому корекція за технічними умовами експлуатації автотранспорту здійснюється шляхом введення коефіцієнтів використання (η_i) й тяжкості режиму роботи (η_r) автотранспорту.

Відомо, що інтенсивність режимів роботи автотранспорту, а також умови експлуатації з огляду на навантаження, визначаються трьома варіантами:

1) легким – $\eta_r = 0{,}7…0{,}8$;

2) середнім – $\eta_r = 1{,}0$;

3) важким – $\eta_r = 1{,}2…1{,}5$.

Режими використання автотранспорту, як умови експлуатації за інтенсивністю його роботи, характеризуються співвідношенням:

$$\eta_i = \eta_{сез} \cdot \eta_{вих} \cdot \eta_{рем} \cdot \eta_{см} \cdot \eta_{маш} \cdot \eta_{заг} \cdot \eta_{пр},$$

де: $\eta_{сез}$ – коефіцієнт сезонності; $\eta_{вих}$ – коефіцієнт вихідних днів; $\eta_{рем}$ – коефіцієнт ремонтних простоїв; $\eta_{см}$ – коефіцієнт змінності роботи; $\eta_{маш}$ – коефіцієнт машинного часу; $\eta_{заг}$ – коефіцієнт завантаження; $\eta_{пр}$ – коефіцієнт вимушених простоїв.

Відповідно, оцінку працездатності та побудову алгоритмів управління автотранспортом можна виконати на підставі наступних умов: 1) за запасом тягового зусилля; 2) за балансом потужності; 3) за курсовою орієнтацією.

Критерій запасу тягового зусилля широко використовується в практиці теорії прохідності автотранспорту. При цьому під прохідністю розуміється здатність автотранспорту рухатися поза дорогами та виконувати покладені на нього транспортні або інші експлуатаційні функції.

Відомо, що можливість руху автотранспорту визначається умовою:

$$\sum T \geq \sum P_{\psi}, \tag{1}$$

де: $\sum T$ – сумарна сила тяги; $\sum P_{\psi}$ – сумарна сила опору руху.

Для оцінки мобільності за прохідністю можна запропонувати систему критеріїв у вигляді потужної функції (запас потужності):

$$\Delta W = G_A v_A(\Phi_{\phi} - \Phi_f) = f_W(\lambda_к, \lambda_e, \lambda_g, \lambda_a, \lambda_p), \tag{2}$$

де: G_A – повна вага автотранспорту; v_A – швидкість руху автотранспорту,

або у вигляді запасу тяги – силової функції:

$$\Delta P = G_A(\Phi_{\varphi} - \Phi_f) = f_P(\lambda_к, \lambda_e, \lambda_g, \lambda_a, \lambda_p). \tag{3}$$

Критерій прохідності може мати й безрозмірну форму:

$$\Delta\Phi = (\Phi_{\varphi} - \Phi_f) = f_{\Phi}(\lambda_к, \lambda_e, \lambda_g, \lambda_a, \lambda_p), \tag{4}$$

де: Φ_{φ} – узагальнена функція зчеплення автотранспорту з дорогою; Φ_f – узагальнена функція опору руху автотранспорту. $\lambda_к$ – параметри автотранспорту; λ_e – характеристики умов експлуатації з урахуванням властивості та параметрів дороги; λ_g – параметр завантаження; λ_a – параметр запиленості дороги; λ_p – параметри, що характеризують кінематичні та силові режими руху.

Характеристики Φ_{φ} та Φ_f називаються узагальненими параметрами взаємодії автотранспорту із дорогою. Зокрема, ці параметри можуть розглядатися як окремо, так і у вигляді будь-яких комплексних характеристик: $\lambda \equiv \xi(\lambda_к, \lambda_e, \lambda_g, \lambda_a, \lambda_p)$.

Значення будь-якого параметра $\lambda_{к,\ э,\ g,\ a,\ p}$ вважається критичним з точки зору можливості руху автотранспорту за умови:

$$\Delta W = 0, \quad \Delta P = 0, \quad \Delta\Phi = 0.$$

При цьому слід використовувати критерій оптимальної реалізації режимів руху по прохідності але стосовно умов експлуатації автотранспорту:

$$\Delta P_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \max_{\lambda \in \Lambda}, \tag{5}$$

при обмеженні $\Delta P_{\phi}(\Phi_{\phi}, \Phi_f, \lambda) \geq 0$, $\lambda \equiv \xi(\lambda_к, \lambda_e, \lambda_g, \lambda_a, \lambda_p)$.

Зауважимо, що оцінки мобільності автотранспорту за запасом тягового зусилля недостатньо. Тягове зусилля розглядає лише силовий бік процесу. При цьому необхідне й потужне забезпечення працездатності автотранспорту, що має бути збалансована як за конструкційними можливостями автотранспорту, так і умов експлуатації. Зокрема, це виражається нерівністю:

$$W_f \eta_{\text{та}}^{-1} \leq W_{\text{еу}} \leq W_{\varphi} \eta_{\text{та}}^{-1},$$

де: η_{ma} – коефіцієнт корисної дії силової передачі та ходової частини автотранспорту.

Якщо не виконуватиметься ліва частина нерівності, то станеться втрата працездатності автотранспорту через великий зовнішній опір руху.

Для комплексної оцінки мобільності автотранспорту в системі «автомобіль – місцевість» можна запропонувати критерій оптимальної реалізації режимів руху за балансом потужності в конкретних експлуатаційних умовах:

$$W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda) \rightarrow \min_{\lambda \in \Lambda}, \tag{6}$$

при обмеженні: $W_{\varphi}(\Phi_{\varphi}, \lambda) \geq [W_f(\Phi_f, \lambda) + \Delta W(\Phi_{\varphi}, \Phi_f, \lambda)]$.

Поняття оптимальності балансу потужності автотранспорту безпосередньо має зв'язок з вхідними характеристиками двигуна.

Відзначимо, що транспортно-технологічний режим руху автотранспорту характеризується численними показниками, за якими оцінюється здатність автотранспорту до курсової орієнтації та відповідної йому стійкості.

З урахуванням методики курсової орієнтації можна використати модифікований показник:

$$\Phi_R = \chi(\alpha i R L t)^{-1} = \Phi_R(\lambda = v_{TTM} R^{-1}), \tag{7}$$

де: χ – зміщення полюса повороту від лінії, що перпендикулярна до поздовжньої осі автотранспорту та проходить через його центр мас; α – кут повороту керуючого елемента автотранспорту; i – передатне число механізму повороту; R – радіус повороту автотранспорту; L – база автотранспорту; t – час реакції на керуючий вплив.

У цьому випадку параметр λ доцільно ставити як поперечне прискорення центру мас автотранспорту.

Для всебічної оцінки мобільності автотранспорту щодо курсової орієнтації в системі «автомобіль – місцевість» можна запропонувати критерій оптимального здійснення режимів руху з урахуванням керованості в конкретних експлуатаційних умовах:

$$\Phi_R(\Phi_\varphi, \Phi_f, \lambda) \to \min_{\lambda \in \Lambda}, \tag{8}$$

за умови, що $\Phi_R(\Phi_\varphi, \Phi_f, \lambda) \le 0$.

При малих значеннях параметра λ, що може виражати або швидкість, або прискорення, величина Φ_R однакова для трьох розглянутих характеристик:

$$\Phi_R > 0; \quad \Phi_R = 0; \quad \Phi_R < 0.$$

Характеристики $\Phi_R(\lambda)$ істотно різняться зі збільшенням поперечного прискорення, тобто зі зростанням λ.

Найкращими з погляду керованості є характеристики $\Phi_R < 0$. У цьому випадку запас недостатньої обертаності зменшується більш плавно. Однак і в цьому випадку при деяких значеннях узагальненої функції зчеплення (Φ_ϕ) втрата недостатньої керованості може бути дуже інтенсивною.

Під час руху водій автотранспорту може визначити таке значення параметра λ (поперечного прискорення), при перевищенні якого стійкість автотранспорту миттєво знижується і керувати ним стає важко.

Слід відзначити, що характеристика $\Phi_R > 0$ незадовільна за керованістю. Всупереч тому, що запас недостатньої обертаності при малих значеннях параметра λ зростає, при значних поперечних прискореннях (λ) відбувається його різке зниження. При цьому водієві важко пристосуватися до керування автотранспортом.

Найкращою з розглянутих у діапазоні малих та середніх поперечних прискорень (λ) є характеристика $\Phi_R = 0$. При великих значеннях параметра λ вказана характеристика буде найгіршою внаслідок різкого зниження запасу недостатньої обертаності.

У якийсь момент збільшення поперечного прискорення у водія не залишиться часу, щоб пристосуватися до автотранспорту з такою зміною характеристики. При цьому автотранспорт з характеристикою $\Phi_R = 0$ менш безпечний, ніж із характеристикою $\Phi_R < 0$.

Висновки

Оцінку працездатності автотранспорту в системі «автомобіль – місцевість» та підтримку мобільності автотранспорту (за умови: λ_p = var, $\lambda_к$ = const, λ_g = const, $\lambda_э$ = const) можна виразити через такі критерії:

1. Керування рухом визначається з урахуванням заводської конструкції автотранспорту та специфічних умов його експлуатації.
2. Оптимальна конструкція автотранспорту розробляється для заданих умов експлуатації та обраних режимів управління рухом.
3. Ключові характеристики умов експлуатації визначаються з урахуванням заводської конструкції автотранспорту, специфічних експлуатаційних умов та вибраних режимів управління рухом.
4. Для конкретних умов експлуатації, вибраних режимів управління та оптимальної конструкції автотранспорту визначаються найбільш ефективні режими навантаження вантажної платформи.

Критерії для вирішення завдань, що пов'язані з підтримкою працездатності автотранспорту, вказують на необхідність переходу до системи забезпечення працездатного стану автотранспорту в конкретних експлуатаційних умовах, що потребує подальших досліджень.

Список використаної літератури

1. Положення про технічне обслуговування і ремонт дорожніх транспортних засобів автомобільного транспорту. Наказ МТУ № 102 від 30.03.98. м. Київ.
2. Полянський А. С., Нестеренко А. А., Молодан А. А. [та ін.]. Принципи та структура адаптивної системи технічного обслуговування та ремонту автотракторної техніки. *Вісник ХНТУСГ*. Зб. наук. тр. ХНТУСГ, 2005. № 40. С. 110–117.
3. ДСТУ 3587–97. Безпека дорожнього руху. Автомобільні дороги, вулиці та залізничні переїзди. Вимоги до експлуатаційного стану. Київ. Держстандарт України.
4. Про затвердження Правил охорони праці під час експлуатації об'єктів циклічно-потокової технології відкритих гірничих робіт, Міністерство соціальної політики України, наказ № 1524 від 22.09.2017, м. Київ.
5. Бажинов А. В. Прогноз та управління в системі ТО та ремонту автомобілів. *Вісник ХДАДТУ*. Харків, 2000. №. 12–13. С. 34–37.

6. Літвинов, О. І. Фізико-хімічні процеси на дорогах при дощах та вплив на ефективність гальмування. *Вісник дорожнього транспорту*, 2022. 10, С. 88–95.

7. Подрігало М. А. Кухтов В. Г., Полянський А. С. Забезпечення надійності автотракторної техніки адаптивними методами технічного обслуговування та ремонту. *Автомобільний транспорт*. Х. : ХДАДТУ, 2000. Вип. 4. С. 49–51.

8. Степанов О. В. Лемішко Д. С. Вантажний автотранспорт як складна технічна система. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез та доп. міжнар. конф., 11–12 берез. 2024 р. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ФОП Бровін О. В., 2024. С. 257–260.

9. Степанов О. В., Волобуєва Т. В. Адаптивна система технічного обслуговування автотранспорту. *Автомобільний транспорт та інфраструктура*. Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції (18–20 квітня 2024 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2024. С. 129–132.

10. Хітров І. О. Дослідження впливу конструктивної надійності і безпечності транспортного засобу для здійснення перевезень та пристосованості до технічного обслуговування. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький, 2024. С. 214–222.

11. Stepanov A. V. Motor vehicle safety (2015) Wydawca: Sp. z.o.o. “Nauka i Studia”, seria: Techniczne nauki, Przemyśl, Poland,. NR 5(136). P. 32–38.

12. C. Jotin Khisty, B. Kent Lall. (2016) Transportation Engineering. Pearson India,. 840 p. ISBN 9332587647, 9789332587649.

References

1. Regulation on maintenance and repair of road vehicles of road transport, Order of the Ministry of Transport of Ukraine No. 102 of March 30, 1998, (1998). Kyiv [in Ukrainian].

2. Polianskyi A. A., Nesterenko A. A., Molodan A. A [and others]. (2005). Principles and structure of the adaptive system of maintenance and repair of motor vehicles. *Bulletin of the KhNTUSG Collection of scientific papers*. KhNTUSG. No. 40. 110–117 [in Ukrainian].

3. DSTU 3587-97. (1997). Road traffic safety. Highways, streets and railroad crossings. Requirements for operational condition. Kyiv. State Standard of Ukraine [in Ukrainian].

4. On Approval of the Rules for Occupational Safety and Health during the Operation of Cyclic-Flow Technology of Open-Pit Mining, Ministry of Social Policy of Ukraine, Order No. 1524 of September 22, 2017. (2017). Kyiv [in Ukrainian].

5. Bazhynov A. V. (2000) Forecast and management in the system of maintenance and repair of cars. *Bulletin of the KhDADTU*. Kharkiv. No. 12–13. 34–37 [in Ukrainian].

6. Litvinov O. I. (2022) Physical and chemical processes on roads in the rain and their impact on braking efficiency. *Bulletin of Road Transport*. 10, 88–95 [in Ukrainian].

7. Podrihalo M. A., Kukhtov V. G., Polianskyi A. S. (2000) Ensuring the reliability of automotive and tractor equipment by adaptive methods of maintenance and repair. *Automobile transport*. Kh.: KhDADTU. Issue 4. 49–51 [in Ukrainian].

8. Stepanov O. V. Lemishko D. S. (2024) Freight transport as a complex technical system. *Power plants and alternative energy sources*: a collection of abstracts and supplementary international conference, March 11–12. 2024 / Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv National Automobile and Highway University – Kharkiv : FOP Brovin O. V. 257–260 [in Ukrainian].

9. Stepanov O. V., Volobueva T. V. (2024) Adaptive system of vehicle maintenance. *Road transport and infrastructure*. Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference (April 18–20, 2024). National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv. 129–132 [in Ukrainian].

10. Khitrov I. O. (2024) Study of the influence of constructive reliability and safety of the vehicle for transportation and adaptability to maintenance. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical sciences*. Kropyvnytskyi. 214–222 [in Ukrainian].

11. Stepanov A. V. Motor vehicle safety (2015) Wydawca: Sp. z.o.o. “Nauka i Studia”, seria: Techniczne nauki, Przemyśl, Poland,. NR 5(136). P. 32–38.

12. C. Jotin Khisty, B. Kent Lall. (2016) Transportation Engineering. Pearson India,. 840 p. ISBN 9332587647, 9789332587649.

УДК 338.47:004.9 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.31

О. В. ТАРАСЕНКО
старший викладач кафедри транспортних технологій
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0001-7882-5481

Т. В. ХАРЧЕНКО
старший викладач кафедри транспортних технологій
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-4587-4652

Г. О. ЛЕБІДЬ
старший викладач кафедри транспортних технологій
Національний університет «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-8629-8623

РОЗВИТОК ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ В УМОВАХ ЦИФРОВІЗАЦІЇ: ЕКОНОМІЧНІ ТА ІНФРАСТРУКТУРНІ АСПЕКТИ

Сучасні процеси цифровізації суттєво впливають на розвиток пасажирського транспорту, сприяючи підвищенню його ефективності, зниженню експлуатаційних витрат і покращенню якості послуг. Інтелектуальні транспортні системи, штучний інтелект, Big Data та IoT дозволяють оптимізувати транспортні потоки, зменшити затори та покращити екологічну ситуацію. Водночас існують значні виклики, пов'язані з адаптацією інфраструктури, необхідністю внесення регуляторних змін і високими фінансовими витратами на впровадження цифрових рішень. Дослідження цих аспектів є особливо важливим у контексті сталого розвитку транспортної системи та підвищення якості пасажирських перевезень.

Метою статті є аналіз впливу цифровізації на розвиток пасажирського транспорту, оцінка економічних та інфраструктурних аспектів упровадження цифрових технологій, а також визначення ключових викликів і перспектив їх подальшого використання.

В дослідженні використано комплексний підхід, що включає методи системного та порівняльного аналізу, а також статистико-економічні методи для оцінки ефективності цифрових інструментів у сфері пасажирського транспорту.

У статті проаналізовано вплив цифровізації на розвиток пасажирського транспорту, оцінено економічні й інфраструктурні аспекти впровадження цифрових технологій, а також виокремлено основні виклики та перспективи їх подальшого використання. Результати дослідження свідчать, що цифровізація сприяє оптимізації транспортних потоків, підвищенню доступності та безпеки перевезень, а також зниженню витрат на експлуатацію транспорту. Запровадження інтелектуальних транспортних систем сприяє зменшенню часу очікування транспорту, підвищенню точності дотримання розкладу та покращенню якості обслуговування пасажирів. Автоматизація процесів управління рухом дозволяє оптимізувати маршрути громадського транспорту, враховуючи реальний пасажиропотік, погодні умови та дорожню ситуацію, що сприяє зниженню рівня заторів. Основними бар'єрами цифровізації транспорту є висока вартість модернізації інфраструктури, відсутність єдиної цифрової платформи для управління пасажирськими перевезеннями, а також потреба у вдосконаленні законодавчої бази для інтеграції цифрових рішень у транспортну систему.

Ключові слова: *автоматизоване управління рухом, безконтактна оплата, економічний розвиток міст, мобільні застосунки, транспортна галузь.*

O. V. TARASENKO
Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
ORCID: 0000-0001-7882-5481

T. V. KHARCHENKO
Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
ORCID: 0000-0003-4587-4652

H. O. LEBID
Senior Lecturer at the Department of Transport Technologies
National University "Zaporizhzhia Polytechnic"
ORCID: 0000-0002-8629-8623

DEVELOPMENT OF PASSENGER TRANSPORT IN THE CONDITIONS OF DIGITALIZATION: ECONOMIC AND INFRASTRUCTURE ASPECTS

The ongoing digitalization processes are profoundly impacting the evolution of passenger transportation, resulting in heightened efficiency, diminished operational expenditures, and enhanced quality of service. Intelligent transportation systems, artificial intelligence, Big Data, and the Internet of Things (IoT) are pivotal in optimizing transport flows, alleviating congestion, and improving environmental outcomes. Nevertheless, notable challenges remain, such as adapting existing infrastructure, regulatory reforms, and the substantial financial investments required to adopt digital solutions. Research in these domains is essential for advancing sustainable transportation systems and enhancing passenger transport quality.

This study endeavors to analyze the effects of digitalization on the development of passenger transportation, evaluate the economic and infrastructural dimensions of digital technology implementation, and identify key challenges and future opportunities for further application.

Employing a multifaceted approach that incorporates systems analysis, comparative methodologies, and statistical and economic techniques, this research assesses the efficacy of digital instruments within the passenger transportation sector. The findings elucidate how digitalization promotes the optimization of transport flows, boosts accessibility and safety, and lowers operational costs. Implementing intelligent transportation systems reduces waiting times, improves schedule adherence, and increases passenger service quality. Furthermore, the automation of traffic management processes allows for optimizing public transport routes by incorporating real-time data regarding passenger flows, weather conditions, and road situations, thereby mitigating congestion.

The principal barriers to the digitalization of transportation include the substantial costs associated with infrastructure modernization, the absence of a cohesive digital platform for passenger transport management, and the imperative to enhance the legislative framework governing the integration of digital technologies into the transportation system.

Key words: *transport industry, economic development of cities, automated traffic management, contactless payment, mobile applications.*

Постановка проблеми

Сучасний світ стрімко змінюється під впливом цифрових технологій, які розповсюджуються у всі сфери життя, зокрема й у транспортну галузь. Пасажирський транспорт відіграє ключову роль у забезпеченні мобільності населення, впливаючи як на якість життя, так і на економічний розвиток міст та регіонів. Однак традиційні моделі управління транспортом часто не відповідають сучасним викликам: перевантаженість міських доріг, низька ефективність маршрутної мережі, екологічні проблеми та застаріла інфраструктура. Цифровізація відкриває нові можливості для вдосконалення пасажирських перевезень, дозволяючи підвищити їхню ефективність, знизити витрати та зробити користування громадським транспортом зручнішим для пасажирів. Інтелектуальні транспортні системи, аналіз великих даних (Big Data), автоматизоване управління рухом, безконтактна оплата, цифрові платформи моніторингу транспорту та мобільні застосунки для користувачів – це лише частина інновацій, що формують сучасну транспортну систему.

В Україні цифрова трансформація громадського транспорту стає дедалі актуальнішою, особливо в контексті реалізації Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року. Однак її впровадження потребує комплексного підходу, узгоджених рішень між державою, перевізниками та громадськістю. Дане дослідження аналізує основні економічні й інфраструктурні аспекти цифровізації пасажирського транспорту, виявляє ключові виклики та пропонує можливі шляхи їх подолання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сучасні дослідження в галузі розвитку пасажирського транспорту в умовах цифровізації здебільшого зосереджуються на впливі інноваційних технологій на ефективність транспортних систем, економічну доцільність цифрових рішень, а також вивчають їхній вплив на інфраструктуру.

Наукові розвідки К. Мустафаїв [1], М. Крамарж та Е. Пржибильської [2] були присвячені аналізу економічної ефективності впровадження цифрових технологій у транспортній сфері. Основні висновки демонструють, що цифровізація сприяє оптимізації витрат на експлуатацію транспорту, підвищенню його завантаженості та зменшенню негативного впливу на довкілля. Однак науковці також звертають увагу на високі початкові витрати на модернізацію інфраструктури та необхідність формування відповідної нормативно-правової бази.

Дослідження В. Даніл'яна та ін. [3], Н. Каличева та В. Масан [4], М. Руденко [5] розглядали вплив цифрових платформ та інтелектуальних транспортних систем (ІТС) на інфраструктуру міст. Виявлено, що запровадження систем Big Data, IoT та штучного інтелекту (далі ШІ) в управлінні транспортними потоками підвищує

ефективність міської мобільності, сприяє зменшенню заторів і покращенню безпеки пасажирів. Водночас дослідники зазначили проблему недостатньої адаптації традиційних транспортних систем до цифрових змін, що уповільнює процес їхньої інтеграції.

Попри значну кількість досліджень, залишаються певні наукові прогалини у знаннях. Зокрема, недостатньо розглянуто питання адаптації цифрових рішень у регіональному пасажирському транспорті, економічних ризиків цифровізації, а також потреби в комплексному реформуванні транспортної політики. У зв'язку з цим, дане дослідження спрямоване на аналіз цифрових інструментів у сфері пасажирських перевезень та оцінку їхнього впливу на економічну ефективність і розвиток транспортної інфраструктури.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є аналіз впливу цифровізації на розвиток пасажирського транспорту, оцінка економічних та інфраструктурних аспектів упровадження цифрових технологій, а також визначення ключових викликів і перспектив їх подальшого використання.

Для досягнення поставленої мети було поставлено такі завдання:

– проаналізувати сучасні наукові підходи та дослідження щодо цифровізації пасажирського транспорту;
– виявити основні перешкоди та ризики цифровізації транспортної галузі;
– запропонувати рекомендації щодо оптимізації процесу цифрової трансформації пасажирського транспорту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Сучасний міський пасажирський транспорт стрімко трансформується під впливом цифрових технологій, які не тільки покращують його економічні показники, але і суттєво змінюють саму транспортну інфраструктуру. Завдяки цифровізації громадський транспорт стає зручнішим, доступнішим і більш ефективним як для пасажирів, так і для операторів перевезень. Автоматизовані системи управління рухом дозволяють зменшити затримки, оптимізувати маршрути та підлаштовувати їх у режимі реального часу відповідно до актуального трафіку. Розумні платформи моніторингу транспорту забезпечують контроль за станом рухомого складу, дозволяють прогнозувати поломки та скорочувати витрати на обслуговування. Завдяки сучасним безконтактним системам оплати пасажири можуть швидко та безпечно оплачувати проїзд, що значно скорочує час зупинок і підвищує пропускну здатність транспорту. Інтелектуальні транспортні системи (ITS) інтегрують дані з різних джерел, аналізують їх і допомагають створювати комфортні умови для пересування мешканців міста. Цифрова трансформація відкриває нові можливості для розвитку громадського транспорту, роблячи його більш екологічним, зручним та ефективним. Це не просто технологічний прогрес, а покращення якості життя мільйонів людей, які щодня користуються громадським транспортом.

Для забезпечення сталого розвитку й ефективного функціонування транспортної системи українських міст необхідно чітко визначити принципи державної транспортної політики. Саме цьому присвячена «Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року», яка була ухвалена ще в 2018 році. Однак у сучасних умовах її реалізація значно уповільнилася, зокрема через пріоритетність воєнних потреб [6]. Документ, затверджений Кабінетом Міністрів, визначає транспортну галузь як ключову складову економіки, яка, хоча і задовольняє основні потреби населення у перевезеннях, проте не зовсім відповідає сучасним вимогам щодо якості. Для виходу з кризи необхідно підвищити ефективність і конкурентоспроможність галузі, використовуючи науково обгрунтовані підходи. Один із ключових аспектів розвитку громадського транспорту – цифрова трансформація, основні особливості якої систематизовано у Таблиці 1. Слід підкреслити, що цифровізація транспорту має як технологічний, так і економічний вимір. Автоматизація та аналітика допомагають оптимізувати витрати перевізників, підвищити ефективність рухомого складу та скоротити експлуатаційні витрати. Водночас, цифрові сервіси дозволяють підвищити якість послуг, адаптувати маршрути під реальні потреби населення та зробити транспорт більш доступним.

Одна з ключових проблем сучасного міста – це баланс між індивідуальним і громадським транспортом. Власний автомобіль дає водіям свободу пересування, комфорт, можливість подорожувати за зручним маршрутом та уникати пересадок. Однак велика кількість приватних автомобілів зменшує простір на дорогах, що призводить до заторів, зростання екологічного навантаження та зменшення ефективності транспортної системи загалом. Щоб зрозуміти масштаб проблеми, варто поглянути на порівняння: для перевезення 50 тисяч осіб на годину в одному напрямку потрібно 175 метрів дорожнього простору, якщо всі користуються власними авто. Якщо ці ж пасажири подорожуватимуть автобусами, вистачить 35 метрів, а якщо на потягах або в метро – усього 9 метрів. Це підкреслює, наскільки громадський транспорт ефективніший з погляду використання міського простору [7, с. 494]. Щоб змінити ситуацію, громадський транспорт має стати більш привабливішим, швидшим і комфортнішим. Цифровізація у транспортній галузі здатна забезпечити високу якість обслуговування, зручний розклад, безперебійну роботу маршрутів, а екологічні та сучасні види транспорту допоможуть змінити стереотипи сприйняття громадського транспорту та зробити його першочерговим вибором для мешканців міста.

Цифровізація транспорту також сприятиме розвитку мультимодальних перевезень, де різні види транспорту взаємодіють в єдиній логістичній системі. Це дозволить створити ефективну транспортну інфраструктуру, яка відповідатиме сучасним потребам населення та сприятиме економічному розвитку регіонів. Наприкінці 2021 року в Україні було ухвалено Закон «Про мультимодальні перевезення», який заклав правові та організаційні основи

Таблиця 1

Виклики та рішення у міському транспорті в умовах цифровізації

Виклик	Рішення	Опис
Відсутність збору й аналізу даних	Запровадження інтелектуальних транспортних систем (ITS)	ITS дозволяє аналізувати пасажиропотоки та оптимізувати маршрути в реальному часі
Недостатнє довгострокове планування	Використання цифрових платформ для прогнозування потреб	AI та Big Data допомагають прогнозувати потреби та коригувати графіки руху
Відсутність контролю за ефективністю управління	Цифрові панелі моніторингу управлінських рішень	Цифрові платформи відстежують ефективність перевізників та менеджерів
Низький рівень комунікації між владою, перевізниками та пасажирами	Мобільні додатки та чат-боти для комунікації	Чат-боти та мобільні додатки спрощують зворотний зв'язок між користувачами і владою
Недосконала тарифна політика	Єдиний тарифний простір та електронний квиток	Безконтактні платежі, QR-коди та мобільні додатки для спрощення оплати
Слабкий розвиток мультимодальних перевезень	Інтеграція всіх видів транспорту в єдину систему	Цифрові мультимодальні платформи для зручного поєднання різних видів транспорту
Зношена транспортна інфраструктура	Розумні зупинки та модернізація інфраструктури	Розумні зупинки з датчиками, що інформують про час прибуття та завантаженість транспорту
Фінансові труднощі через пільгові перевезення	Автоматизація компенсацій за пільгові перевезення	Блокчейн для прозорого контролю й автоматизації компенсацій перевізникам
Високий рівень викидів транспорту	Розвиток електробусів, тролейбусів, водневого транспорту	Перехід на екологічний транспорт із використанням сучасних цифрових рішень
Перевантаженість маршрутів і низька ефективність	Оптимізація маршрутів за допомогою Big Data	Big Data та AI аналізують пасажиропотоки для оптимізації маршрутної мережі

Джерело: вдосконалено авторами на основі [6].

для розвитку цього виду транспорту. Документ спрямований на створення сприятливих умов для поєднання різних видів перевезень, стимулювання використання екологічно чистого транспорту та зменшення негативного впливу на довкілля [8, с. 63]. Впроваджуючи дану стратегію транспортна галузь України отримає сучасний напрямок розвитку, однак його реалізація потребує значного доопрацювання з урахуванням сучасних викликів, технологічного прогресу й економічної ситуації. Приклади впровадження мультимодальних транспортних стратегій у різних країнах світу наведені у Таблиці 2.

Таблиця 2

Приклади впровадження мультимодальних транспортних систем у світі

Країна	Основні види транспорту	Домінуючий транспорт	Система оплати	Особливості мультимодаль-ності	Додаткові сервіси
Канада	Автобуси, метро, трамваї, легкі залізниці	Автобуси (більшість електричні)	Єдиний квиток на всі види транспорту, діє протягом певного періоду	Легкий перехід між видами транспорту без додаткової оплати	Екологічний транспорт, зручні розклади
США (Нью-Йорк)	Метро, автобуси, електрички, пороми, канатна дорога	Метро (основна частина системи MTA)	MetroCard, OMNY (безконтактні картки, електронні гаманці, мобільні додатки)	Взаємопов'язані розклади руху, безперешкодна пересадка за єдиним квитком	MTA Trip Planner для планування маршрутів
Німеч-чина (Гам-бург)	Метро, автобуси, пороми, залізниця	Метро й автобуси	Єдині квитки на різні види транспорту, інтеграція з квитками на потяги й інші сервіси	Відсутність турнікетів, довіра до пасажирів, інтеграція з квитками на культурні заходи	Гнучкі квиткові системи (групові квитки, квитки, що включають інші сервіси)

Джерело: узагальнено авторами на основі [8, с. 63].

Дослідження якості міських пасажирських перевезень довело, що чинні нормативні вимоги не відповідають очікуванням пасажирів. Опитування в Києві виявило, що ключовими критеріями для пасажирів є доступність транспорту, швидкість руху та загальні витрати часу, тоді як комфортність та поведінка водіїв мають менший вплив [9, с. 225]. В умовах цифровізації необхідно створити гнучку систему оцінки якості транспорту, що дозволить оперативно реагувати на зміни попиту та підвищити конкурентоспроможність перевізників. Використання цифрових технологій для моніторингу та регулювання стандартів якості сприятиме ефективнішій організації транспортної інфраструктури та покращенню рівня обслуговування.

В умовах розвитку міського пасажирського транспорту вибір оптимальної маршрутної мережі стає стратегічно важливим завданням. Оскільки існуючі маршрути здебільшого не повністю відповідають потребам населення, необхідно моделювати й аналізувати штучно згенеровані альтернативи, які можуть забезпечити ефективніший розподіл ресурсів і покращення транспортного сполучення [10, с. 21]. Для ухвалення обґрунтованих рішень щодо розвитку маршрутної мережі доцільно використовувати цифрові системи підтримки прийняття рішень. Така система включає аналіз поточної мережі маршрутів, вивчення реального попиту на перевезення, виявлення

дублювання маршрутів, оптимізацію пасажиропотоків і визначення необхідної місткості транспортних засобів. Запровадження цифрових рішень у плануванні міських перевезень дозволить підвищити ефективність використання інфраструктури, зменшити витрати та адаптувати транспортну систему до реальних потреб мешканців.

Розвиток «розумних» міст є ключовим мегатрендом, що відкриває нові можливості для управління урбаністичним простором. Центральною ідеєю smart-міста є збір і аналіз великих масивів даних для покращення якості життя мешканців та ефективного управління міською інфраструктурою, зокрема громадським транспортом. Smart-інфраструктура громадського транспорту має стати невід'ємною частиною цифрової трансформації міст. Її основою є запровадження єдиного електронного квитка, що дозволить пасажирам комбінувати різні види транспорту без дублювання оплати. Важливим компонентом також є інтелектуальна диспетчеризація, яка динамічно адаптуватиме маршрути та кількість транспорту залежно від часу доби, сезону і пасажиропотоку. Єдина диспетчерська служба, яка об'єднає всі види транспорту (автобус, метро, залізницю, таксі, аеропорти тощо), дозволить ефективніше керувати транспортними потоками та створити Є-транспорт – єдину інтегровану систему перевезень. Використання хмарних технологій сприятиме безперебійному доступу до даних для всіх учасників транспортного процесу, а також забезпечить кібербезпеку. Українські міста вже активно впроваджують smart-рішення. Київ, Харків, Львів, Дніпро та інші населені пункти, включно з меншими містами, розвивають цифрові транспортні проєкти, зосереджуючи увагу на міській мобільності й електротранспорті [11, с. 87]. Ці ініціативи є важливими кроками до створення сучасної, екологічної і зручної транспортної системи.

Управління перевезеннями пасажирів вимагає глибших технологічних знань і спеціалізованих рішень. Використання систем смарт-обліку – цифрової системи управління й аналізу даних у реальному часі, яка автоматизує облік, моніторинг та оптимізацію ресурсів у транспортній сфері, дозволяє оптимізувати логістичні процеси, покращити контроль за перевезеннями і підвищити ефективність транспортної компанії [12, с. 443]. Дана система використовує сучасні технології, такі як IoT, ШІ та великі дані, для підвищення ефективності перевезень, зниження витрат і покращення якості транспортного обслуговування. В поєднанні з цифровими технологіями це сприяє прозорості, економії ресурсів і кращій організації транспортних потоків.

Успішними прикладами систем смарт-обліку є Octopus у Гонконзі та Oyster у Лондоні. Octopus дозволяє не лише оплачувати проїзд у громадському транспорті, але і здійснювати покупки в магазинах, ресторанах та торгових автоматах. Oyster забезпечує зручний доступ до всіх видів громадського транспорту Лондона, включаючи метро, автобуси, трамваї і міські потяги [12, с. 444]. Досвід світових мегаполісів доводить, що ефективне управління оплатою проїзду потребує інноваційних рішень на основі цифрових технологій, які спрощують ці процеси для пасажирів і підвищують прозорість фінансових потоків у транспортній сфері.

З розвитком концепції «розумних» міст частка інтелектуальних перевезень у транспортній сфері невпинно зростає. За існуючими прогнозами ринок інтелектуальних транспортних систем (ITS) подвоїться до 2030 року та досягне 52,24 млрд доларів США. Однак у 2023 році через глобальну нестабільність темпи інвестування в цю сферу сповільнилися до 6 % на рік порівняно з 21 % у 2022 році. Попри це, фінансування систем управління дорожнім рухом і пасажиропотоками залишається стабільно високим. У 2022 році 30 % ринку ITS припадало на управління трафіком, а 24 % – на організацію пасажирських перевезень [13, с. 70]. Пріоритетність саме пасажирського транспорту пояснюється його соціальною значущістю для міських територій.

Щоб підвищити ефективність перевезень у smart-містах, транспортні компанії активно впроваджують цифрові технології (Рис. 1), які забезпечують зручність, безпеку й оптимізацію міської мобільності. GPS забезпечує

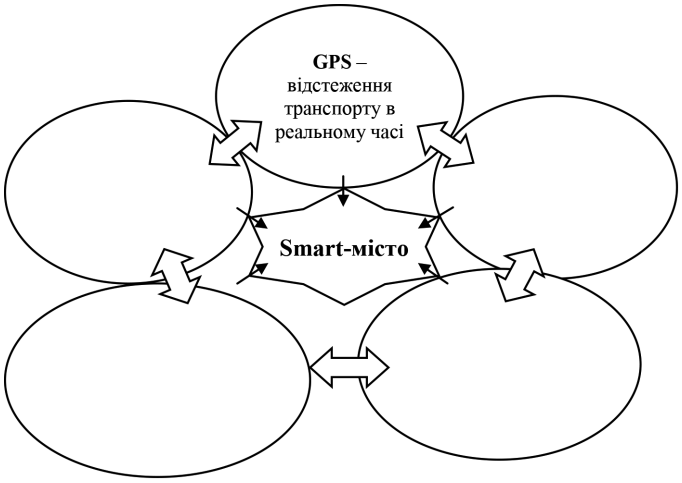


Рис. 1. Цифрові технології у Smart-місті

Джерело: узагальнено авторами на основі [13, с. 72].

моніторинг транспорту в реальному часі, дозволяючи пасажирам відстежувати прибуття, а операторам – оптимізувати маршрути. NFC спрощує оплату проїзду, скорочуючи час зупинок і витрати на друк квитків. Використання IoT допомагає автоматично підраховувати пасажирів і керувати заповненістю транспорту, що дає змогу динамічно коригувати частоту рейсів. GeoIS аналізують дорожню ситуацію й адаптують маршрути до змін трафіку, мінімізуючи затримки [13, с. 71].

Упровадження цих технологій дозволяє створити більш динамічну й адаптивну транспортну систему, яка відповідає сучасним вимогам міської мобільності, сприяє скороченню заторів, покращує екологічну ситуацію та підвищує якість життя мешканців.

Аналіз досвіду інтелектуалізації транспортної інфраструктури в Україні та світі дозволяє визначити сім ключових тенденцій розвитку пасажирського транспорту в умовах smart-міста. Серед них – інтеграція різних видів транспорту в єдину систему, екологічна модернізація, цифровізація оплати, персоналізація послуг, автономні технології для підвищення безпеки, електрифікація транспорту й оптимізація міського простору для ефективного руху автотранспорту. Більш детальніше дані вектори цифрового розвитку smart-міста описані в Таблиці 3. Кожен із цих напрямів змінює підхід до організації перевезень та безпосередньо впливає на фінансову стабільність перевізників. Використання цифрових та екологічних рішень допомагає знижувати витрати, оптимізувати маршрути і покращувати якість обслуговування пасажирів, що робить громадський транспорт більш ефективним і привабливим для користувачів.

Таблиця 3

Тренди розвитку пасажирського транспорту

Тренд	Опис	Економічний вплив	Інфраструктурний вплив
Інтеграція	Єдина цифрова платформа для управління транспортом	Зниження витрат на адміністрування та контроль	Спрощене управління міським транспортом
Екологізація	Зменшення використання приватного транспорту	Оптимізація витрат на екологічні заходи	Менше викидів і навантаження на дороги
Діджиталізація оплати	Автоматизація оплати, мінімізація витрат на персонал	Скорочення витрат на персонал та інфраструктуру	Швидка оплата та мінімізація черг
Комодифікація	Оптимізація маршрутів і тарифів за попитом пасажирів	Зменшення витрат на аналіз маршрутної мережі	Гнучке планування маршрутів за реальним попитом
Автономність і безпека	Автономне керування та зниження аварійності	Зниження витрат на страхування та ремонти	Безпека пасажирів і зниження аварій на дорогах
Електрифікація	Перехід на електротранспорт, економія пального	Економія на пальному та технічному обслуговуванні	Розширення мережі зарядних станцій
Просторове переміщення	Розвиток підземного та повітряного транспорту	Зменшення простоїв транспорту, покращення мобільності	Менше заторів і покращена логістика транспорту

Джерело: узагальнено авторами на основі [13, с. 72].

Інформаційне середовище постає ключовим елементом функціонування смарт-міста, забезпечуючи ефективну організацію пасажирських перевезень завдяки інноваційним цифровим технологіям. Синергія технологій дозволяє підвищити якість транспортних послуг, збільшити пасажиропотік і скоротити час пересування містом. Завдяки механізмам саморегуляції смарт-місто створює комфортне, безпечне й економічно ефективне середовище для всіх учасників транспортної системи.

Цифрові технології докорінно змінили транспортні системи, відкривши нові можливості для їх модернізації, ефективності та сталого розвитку. Інновації, такі як ШІ, автоматизація, блокчейн та кібербезпека, стали ключовими елементами сучасної транспортної інфраструктури. Їх вплив виходить далеко за межі звичайного підвищення продуктивності, оскільки вони забезпечують кращу прозорість операцій, економію ресурсів, оперативне ухвалення рішень та ефективне управління ланцюгами постачання [14]. Завдяки цифровим рішенням транспортні системи стають більш адаптивними, безпечними та здатними швидко реагувати на виклики сучасного міста.

Оптимізація громадського транспорту у великих містах також сприяє зменшенню викидів вуглецю та покращенню якості життя мешканців, що набуває надзвичайної важливості в контексті збереження екології. Наприклад, у Парижі міська влада впровадила нову транспортну політику, яка віддала пріоритет автобусам і велосипедним доріжкам. Це дозволило скоротити кількість приватних автомобілів на дорогах і зменшити викиди CO_2 на 14 %. Богота стала ще одним прикладом успішного реформування транспорту завдяки системі швидкого автобусного сполучення (BRT). Відома як TransMilenio, вона включає понад 112 км виділених автобусних смуг і щодня обслуговує понад 2,6 млн пасажирів. Використання зчленованих автобусів із високою місткістю дозволяє уникати заторів, а система безконтактної оплати пришвидшує посадку. Це сприяло зменшенню викидів CO_2 більш ніж на 300 тис. тонн щорічно, що еквівалентно виведенню з доріг 60 тис. автомобілів. Схожі ініціативи з електрифікації громадського транспорту активно розвиваються в Австралії та інших країнах. Досвід цих міст доводить, що розумне планування транспортної інфраструктури може суттєво зменшити викиди, зробити міста екологічнішими та підвищити рівень життя їх мешканців [15, с. 119]. Окрім екологічного ефекту, TransMilenio суттєво покращила

мобільність пасажирів, особливо в районах із низьким рівнем доходів, а також сприяла розвитку громадських просторів. Попри проблеми з переповненістю транспорту в години пік, міська влада продовжує модернізувати систему та впроваджувати нові технології.

Отже, цифрові технології сьогодні стали невід'ємною частиною як економічної, так і соціальної діяльності. В сучасних ринкових умовах жодна галузь не може ефективно розвиватися без упровадження цифрових рішень, і транспортна сфера не стала винятком. Використання цифрових інструментів у цій галузі допомагає впроваджувати перевірені рішення, які спрощують взаємодію між усіма учасниками процесу перевезень. Це, у свою чергу, дозволяє значно зменшити часові та фінансові витрати, роблячи транспортні послуги більш доступними й ефективними.

Висновки

Цифрова трансформація пасажирського транспорту – це не лише технологічний тренд, а необхідність для сталого розвитку міст. Упровадження інтелектуальних транспортних систем, автоматизація управління маршрутами, використання безконтактної оплати та мобільних сервісів сприятимуть підвищенню ефективності транспортних послуг, зниженню навантаження на дорожню інфраструктуру та покращенню комфорту для пасажирів.

Світовий досвід доводить, що інтеграція цифрових рішень у громадський транспорт дозволяє суттєво зменшити викиди CO_2, зробити перевезення більш гнучкими та підвищити їхню доступність. Українські міста вже розпочали процес впровадження smart-рішень у транспортну інфраструктуру, однак для повноцінної цифровізації необхідно прискорити реалізацію державної транспортної стратегії та забезпечити ефективну співпрацю між державним і приватним секторами.

В результаті цифрових змін громадський транспорт може стати не лише більш ефективним, але і пріоритетним вибором для мешканців міст, що сприятиме зменшенню заторів, покращенню екологічної ситуації і підвищенню якості життя громадян.

Список використаної літератури

1. Mustafayev K. Information technologies in transport: (Industry 4.0; digital transport corridors and platforms; modeling and simulation transport systems, etc.). *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*. 2024. No. 3. P. 183–190. URL: https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-23 (дата звернення: 20.02.2025).

2. Kramarz M., Przybylska E. Multimodal transport in the context of sustainable development of a city. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. No. 4. Article 2239. URL: https://doi.org/10.3390/su13042239 (дата звернення: 20.02.2025).

3. Даніл'ян В. О., Масан В. В., Сидорець Д. П. Цифровий розвиток залізничного транспорту в умовах глобальних перспектив та викликів. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. 2023. № 83. С. 165–170. URL: https://doi.org/10.18664/btie.83.300193 (дата звернення: 20.02.2025).

4. Каличева Н. Є., Масан В. В. Теоретичні аспекти підвищення конкурентоспроможності підприємств залізничного транспорту в умовах цифровізації. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. *Серія: Міжнародні економічні відносини та світове господарство*. 2021. № 35. С. 38–41. URL: https://doi.org/10.32782/2413-9971/2021-35-7 (дата звернення: 20.02.2025).

5. Руденко М. В. Цифрова трансформація пасажирського залізничного транспорту: оцінка ефективності встановлення цифрових екранів та впровадження інтерактивних інформаційних систем в поїздах. *Економічний вісник Дніпровського державного технічного університету*. 2024. № 1(8). С. 110–122. URL: https://doi.org/10.31319/2709-2879.2024iss1(8).306486pp110-122 (дата звернення: 20.02.2025).

6. Приймак В. Розвиток громадського транспорту України в контексті національної транспортної стратегії. *Економіка та суспільство*. 2024. № 68. URL: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-25 (дата звернення: 20.02.2025).

7. Ільїчов А. І. Економіко-організаційні проблеми розвитку громадського транспорту в умовах воєнного стану. *Науково-виробничий журнал «Бізнес-навігатор»*. 2024. № 3 (76). С. 492–495. URL: https://doi.org/10.32782/business-navigator.76-81 (дата звернення: 20.02.2025).

8. Палант О. Ю., Приймак В. О. Мультимодальний громадський транспорт України: перспективи розвитку. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління випуск*. 2023. № 3(40). С. 61–66. URL: https://doi.org/10.32782/easterneurope.40-9 (дата звернення: 20.02.2025).

9. Ільченко В. Ю., Петровська С. І. Підходи до оцінювання якості міських пасажирських перевезень автомобільним транспортом. *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2019. № 3(20). С. 219–226. URL: https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/35.pdf (дата звернення: 20.02.2025).

10. Біліченко В. В., Цимбал С. В., Коробов С. С. Підвищення ефективності системи міських пасажирських перевезень. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2018. № 1(7). С. 18–25. URL: https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/25195/document%20%2841%29.pdf?sequence=1 (дата звернення: 20.02.2025).

11. Палант О. Ю., Захаров Д. С., Приймак В. О. Перспективи розвитку громадського транспорту в контексті створення smart-інфраструктури міст України. *Економіка та управління підприємствами*. 2023. № 84. С. 85–89. URL: https://doi.org/10.32782/bses.84-14 (дата звернення: 20.02.2025).

12. Дискіна А. А. Пропозиції щодо впровадження системи смарт-обліку в міському пасажирському транспорті з використанням новітніх інформаційних технологій. *Економіка і суспільство*. 2017. № 13. С. 442–445. URL: https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/72.pdf (дата звернення: 20.02.2025).

13. Корнят І. Вплив інноваційних трендів розвитку пасажирських перевезень у смарт – місті на фінансові результати. *Світ фінансів*. 2023. № 2(75). С. 64–79. URL: https://doi.org/10.35774/SF2023.02.064 (дата звернення: 20.02.2025).

14. Ложачевська О. М., Марціпака В. М. Інноваційний розвиток транспортного комплексу в умовах цифрової трансформації. *Проблеми сучасних трансформацій. Серія: економіка та управління*. 2023. № 10. URL: https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10 (дата звернення: 20.02.2025).

15. Мацелюх Ю., Литвин В. Аналіз пасажирських перевезень та вплив громадського транспорту на скорочення викидів вуглецю в розумному місті. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 1(27). С. 109–127. URL: https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109 (дата звернення: 20.02.2025).

References

1. Mustafayev, K. (2024). Information technologies in transport: Industry 4.0, digital transport corridors and platforms, modeling and simulation of transport systems. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 183–190. Retrieved from https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-23

2. Kramarz, M., & Przybylska, E. (2021). Multimodal transport in the context of sustainable development of a city. *Sustainability*, 13(4), Article 2239. Retrieved from https://doi.org/10.3390/su13042239

3. Danilian, V. O., Masan, V. V., & Sidorets, D. P. (2023). Tsyfrovyi rozvytok zaliznychnoho transportu v umovakh hlobalnykh perspektyv ta vyklykiv [Digital development of railway transport in the context of global prospects and challenges]. *Bulletin of Transport Economics and Industry*, (83), 165–170. Retrieved from https://doi.org/10.18664/btie.83.300193 [in Ukrainian].

4. Kalycheva, N. Ye., & Masan, V. V. (2021). Teoretychni aspekty pidvyshchennia konkurentospromozhnosti pidpryiemstv zaliznychnoho transportu v umovakh tsyfrovizatsii [Theoretical aspects of increasing the competitiveness of railway transport enterprises in the context of digitalization]. *Scientific Bulletin of Uzhhorod National University. Series: International Economic Relations and the World Economy*, (35), 38–41. Retrieved from https://doi.org/10.32782/2413-9971/2021-35-7 [in Ukrainian].

5. Rudenko, M. V. (2024). Tsyfrova transformatsiia pasazhyrskoho zaliznychnoho transportu: otsinka efektyvnosti vstanovlennia tsyfrovykh ekraniv ta vprovadzhennia interaktyvnykh informatsiinykh system v poizdakh [Digital transformation of passenger railway transport: Efficiency assessment of digital screens installation and implementation of interactive information systems in trains]. *Economic Bulletin of Dnipro State Technical University*, (1(8), 110–122. Retrieved from https://doi.org/10.31319/2709-2879.2024iss1(8).306486pp110-122 [in Ukrainian].

6. Pryimak, V. (2024). Rozvytok hromadskoho transportu Ukrainy v konteksti natsionalnoi transportnoi stratehii [Development of public transport in Ukraine in the context of the national transport strategy]. *Economy and Society*, (68). Retrieved from https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-25 [in Ukrainian].

7. Ilyichov, A. I. (2024). Ekonomiko-orhanizatsiini problemy rozvytku hromadskoho transportu v umovakh voiennoho stanu [Economic and organizational problems of public transport development under martial law conditions]. *Scientific and Industrial Journal Business Navigator*, (3(76), 492–495. Retrieved from https://doi.org/10.32782/business-navigator.76-81 [in Ukrainian].

8. Palant, O. Yu., & Pryimak, V. O. (2023). Multymodalnyi hromadskyi transport Ukrainy: perspektyvy rozvytku [Multimodal public transport in Ukraine: Development prospects]. *Eastern Europe: Economy, Business and Management*, (3(40), 61–66. Retrieved from https://doi.org/10.32782/easterneurope.40-9 [in Ukrainian].

9. Ilchenko, V. Yu., & Petrovska, S. I. (2019). Pidkhody do otsiniuvannia yakosti miskykh pasazhyrskykh perevezen avtomobilnym transportom [Approaches to assessing the quality of urban passenger transportation by road transport]. *Eastern Europe: Economy, Business and Management*, (3(20), 219–226. Retrieved from https://www.easterneurope-ebm.in.ua/journal/20_2019/35.pdf [in Ukrainian].

10. Bilichenko, V. V., Tsymbal, S. V., & Korobov, S. S. (2018). Pidvyshchennia efektyvnosti systemy miskykh pasazhyrskykh perevezen [Increasing the efficiency of urban passenger transportation systems]. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, (1(7), 18–25. Retrieved from https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/25195/document%20%2841%29.pdf?sequence=1 [in Ukrainian].

11. Palant, O. Yu., Zakharov, D. S., & Pryimak, V. O. (2023). Perspektyvy rozvytku hromadskoho transportu v konteksti stvorennia smart-infrastruktury mist Ukrainy [Prospects for the development of public transport in the context of creating smart city infrastructure in Ukraine]. *Economics and Enterprise Management*, (84), 85–89. Retrieved from https://doi.org/10.32782/bses.84-14 [in Ukrainian].

12. Diskina, A. A. (2017). Propozytsii shchodo vprovadzhennia systemy smart-obliku v miskomu pasazhyrskomu transporti z vykorystanniam novitnikh informatsiinykh tekhnolohii [Proposals for the implementation of a smart

accounting system in urban passenger transport using modern information technologies]. *Economy and Society*, (13), 442–445. Retrieved from https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/72.pdf [in Ukrainian].

13. Kornyat, I. (2023). Vplyv innovatsiinykh trendiv rozvytku pasazhyrskykh perevezen u smart – misti na finansovi rezultaty [The impact of innovative trends in passenger transportation development in a smart city on financial results]. *World of Finance*, (2(75), 64–79. Retrieved from https://doi.org/10.35774/SF2023.02.064 [in Ukrainian].

14. Lozhachevska, O. M., & Marcipaka, V. M. (2023). Innovatsiinyi rozvytok transportnoho kompleksu v umovakh tsyfrovoi transformatsii [Innovative development of the transport complex in the context of digital transformation]. *Problems of Modern Transformations. Series: Economics and Management*, (10). Retrieved from https://doi.org/10.54929/2786-5738-2023-10-04-10 [in Ukrainian].

15. Matselyukh, Yu., & Lytvyn, V. (2024). Analiz pasazhyrskykh perevezen ta vplyv hromadskoho transportu na skorochennia vykydiv vuhletsiu v rozumnomu misti [Analysis of passenger transportation and the impact of public transport on carbon emission reduction in a smart city]. *Current State of Scientific Research and Technologies in Industry*, (1(27), 109–127. Retrieved from https://doi.org/10.30837/ITSSI.2024.27.109 [in Ukrainian].

УДК 656.1

DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.32

В. О. ТКАЧ
старший викладач кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8317-3270

О. А. ВОЙТОВИЧ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри транспортних систем і технічного сервісу
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0003-0510-4362

МОНІТОРИНГ ЯКОСТІ ОСВІТИ В УМОВАХ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ

Стаття «Моніторинг якості освіти в умовах дистанційного навчання» авторів Ткач В. О., Войтович О. А. присвячена проблемі моніторингу якості вищої освіти. Якість освіти має велике значення в забезпеченні конкурентоспроможності випускників при працевлаштуванні, як в Україні, так і за її межами. Представлено якість освіти – як комплексу характеристик компетентностей і професійної свідомості, що відбивають здатність фахівця здійснювати професійну діяльність.

Мета дослідження – моніторинг якості освіти студентів інженерно-технічних спеціальностей в умовах дистанційного навчання в період пандемії COVID-19 та під час воєнного стану.

В роботі зазначено, основною функцією освіти, як відомо, є передача від покоління до покоління досвіду, накопиченого людством; в умовах дистанційного навчання важливим завданням є збагачення змісту освіти відповідно до вимог сучасності.

В роботі проведено аналіз: якості підготовки студентів – визначення підготовленості студентів – рівень сформованості ключових компетентностей; якості освітнього процесу – це збалансована відповідність певного освітнього рівня численним потребам, цілям, умовам, затвердженим освітньо-професійним програмам відповідно до стандартів спеціальностей.

За результатами досліджень встановлено, що дистанційне навчання потребує постійної комунікації зі здобувачами вищої освіти, повне дистанційне навчання погіршує його результати. Підсумки незалежних оцінювань найкраще показують якість навчання здобувачів інженерно-технічних спеціальностей, яка залежить від ключових компетентностей, набутих у загальноосвітніх навчальних закладах.

Ключові слова: *моніторинг якості вищої освіти, ключові компетентності, освітній процес, загальноосвітній навчальний заклад, зовнішнє незалежне оцінювання, заклад вищої освіти, фахові компетентності, освітні компоненти.*

V. O. TKACH
Senior Lecturer at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8317-3270

O. A. VOITOVYCH
Candidate of Sciences in Technology, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Systems
and Technical Service
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0003-0510-4362

MONITORING OF THE QUALITY OF EDUCATION IN THE CONDITIONS DISTANCE EDUCATION

The article "Monitoring the quality of education in distance learning" by Tkach V.O., Voitovych O.A. is devoted to the problem of monitoring the quality of higher education. The quality of education is of great importance in ensuring the competitiveness of graduates in employment, both in Ukraine and abroad. The presentation of the quality of education is as a complex of characteristics of competencies and professional awareness that reflect the ability of a specialist to carry out professional activities.

The purpose of the study is to monitor the quality of education of students of engineering and technical specialties in conditions of distance learning during the COVID-19 pandemic and during martial law.

The work states that the main function of education, as is known, is the transfer from generation to generation of experience accumulated by mankind; in conditions of distance learning, an important task is to enrich the content of education in accordance with the requirements of modernity.

The work analyzed: the quality of student training – determination of students' preparedness – the level of formation of key competencies; the quality of the educational process is a balanced compliance of a certain educational level with numerous needs, goals, conditions, approved educational and professional programs according to specialty standards.

According to the results of the research, it was found that distance learning requires constant communication with higher education applicants, full distance learning worsens its results. The results of independent assessments best show the quality of training of applicants for engineering and technical specialties, which depends on the key competencies acquired in general education institutions.

Key words: *quality monitoring of higher education, key competences, educational process, general educational institution, external independent evaluation, higher education institutions, professional competences, educational components.*

Постановка проблеми

Якість вищої освіти має велике значення в забезпеченні конкурентоспроможності випускників при працевлаштуванні як в Україні, так і за її межами. Якість освіти в узагальненому визначенні та своєму підсумковому представленні – це комплекс характеристик компетентностей і професійної свідомості, що відбивають здатність фахівця здійснювати професійну діяльність [3]. Якість вищої освіти починається зі вступника і залежить вона від ключових компетентностей, набутих у загальноосвітніх навчальних закладах, та від побудови освітнього процесу у вищих навчальних закладах, особливо здобувачів інженерно-технічних спеціальностей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Характеристика критеріїв якості освіти прямо залежить від об'єкта дослідження, внаслідок чого її моніторинг може розглядатися як засіб, необхідний для вибору стратегії розвитку професійної підготовки, підстава для оцінки реального рівня освітніх досягнень здобувачів [1].

Якість освіти – багатопланова категорія, тому критерії її оцінки можуть бути самими різними. Можна виділити основні аспекти оцінки якості освіти, які доповнюють один одного:

– гарантоване виконання базових стандартів і еталонів;
– досягнення поставлених цілей на різних етапах навчання (на вході, у процесі й на виході);
– здатність задовольняти попит і очікування споживачів освітніх послуг і зацікавлених учасників освітнього ринку;
– прагнення до вдосконалювання навчання.

Головним критерієм якості освіти в школах для українських вчителів, експертів, директорів шкіл та батьків є опанування учнями ключових компетентностей [3].

Освіта, як і будь-який процес або результат діяльності людини, має визначену якість. Найбільш точним у концептуальному розумінні є таке визначення якості освіти: якість освіти – це комплекс характеристик освітнього процесу, що визначають послідовне та практично ефективне формування компетентності та професійної свідомості. Тут можна виділити три групи характеристик:

– якість потенціалу досягнення мети освіти;
– якість процесу формування професіоналізму;
– якість результату освіти.

Якість потенціалу виражається в таких характеристиках, як якість мети освіти, якість освітнього стандарту, якість освітньої програми, якість матеріально-технічної бази освітнього процесу, якість викладацького складу, якість учнів, якість інформаційно-методичної бази.

Якість процесу формування професіоналізму – це якість технології освіти, контролю освітнього процесу, якість мотивації викладацького складу на творчість та ефективність педагогічної роботи, якість ставлення учнів до освіти, інтенсивність освітнього процесу, управління освітою, методи презентації навчальних досягнень.

Якість результату освіти – усвідомлення професіоналізму, розпізнавання та реалізація індивідуальних здібностей та особливостей, працевлаштування, кар'єра та зарплата, оволодіння методологією самоосвіти, знання, практичні навички.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є моніторинг якості освіти студентів інженерно-технічних спеціальностей в умовах дистанційного навчання в період пандемії COVID-19 та під час воєнного стану. Встановлення загальноосвітнього рівня студентів на основі оцінювання у загальноосвітніх навчальних закладах та порівняння з оцінюванням фундаментальних дисциплін: історія та соціальна культура України; вища математика; нарисна геометрія, інженерна та комп'ютерна графіка; фізика; технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство та ін.

Викладення основного матеріалу дослідження

Основною функцією освіти, як відомо, є передача від покоління до покоління досвіду, накопиченого людством. В умовах дистанційного навчання важливим завданням є збагачення змісту освіти відповідно до вимог сучасності. Успішність реалізації цієї функції залежить від якості освіти.

Загальне визначення якості освіти – наявність суттєвих ознак, властивостей, особливостей, котрі відрізняють один предмет чи явище від інших.

Якість освіти у вищих навчальних закладах залежить від базових знань студентів отриманих у закладах повної загальної середньої освіти (особливо при вивченні фундаментальних дисциплін, що входять у цикл як загальних, так і фахових компетентностей) та від якісної організації освітнього процесу. Гарантоване виконання базових стандартів, еталонів освітньо-професійних програм та дисциплін.

Якість підготовки студентів – якісний склад студентів, визначення підготовленості студентів – показник розвиненості індивідуальних здібностей, творчого потенціалу студента; рівень сформованості ключових компетентностей; подолання багатопланового розриву, що існує між середньою та вищою освітою, підвищення ролі механізмів навчально-професійної орієнтації й мотивації молоді, здатність задовольняти попит й очікування освітніх послуг і зацікавлених учасників освітнього ринку, прагнення до постійного вдосконалення навчального процесу.

Якість освітнього процесу – це збалансована відповідність певного освітнього рівня численним потребам, цілям, умовам, затвердженим освітньо-професійним програмам згідно стандартів спеціальностей (визначається для виявлення причин порушення цієї відповідності та управління процесом поліпшення встановленої якості). Виражається в системі показників (нормативів) знань, умінь, навичок, норм цінісно-емоційного ставлення до світу і один до одного, яка відбиває ступінь задоволення очікувань різних учасників освітнього процесу, від освітніх послуг, а також ступінь досягнення висунутих перед освітою мети і завдань [4].

Підготовка студентів до навчання на здобуття першого освітнього рівня бакалавр технічних спеціальностей таких, як 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування», 274 «Автомобільний транспорт» залежить від таких предметів загальноосвітніх навчальних закладів, як Історія України, Математика, Українська мова, Фізика, Хімія. Але зважаючи на те, що не всі ці дисципліни абітурієнти обирають при проходженні зовнішнього незалежного оцінювання (ЗНО), проведемо порівняльний аналіз оцінювання дисциплін: Історія України, Математика, Українська мова – згідно з даними свідоцтва про ПЗСО, ЗНО та оцінювання цих дисциплін при навчанні у ХНТУ вступників 2020 та 2021 років.



Рис. 1. Оцінювання ПЗСО 2020 рік вступу



Рис. 2. Оцінювання ЗНО 2020 рік вступу



Рис. 3. Оцінювання ХНТУ 2020 рік вступу

Проаналізувавши рисунки 1–3, бачимо у здобувачів, які закінчували заклади повної загальної середньої освіти у 2020 році, тобто яких майже не торкнулося дистанційне навчання, оцінювання ЗНО не відрізняється від оцінювання ПЗСО. Навчання на першому курсі університету 2020/2021 навчального року відбувалось дистанційно, завдяки пандемії COVID-19, тому і результати навчання значно гірші.

Проаналізувавши рисунки 4–6, бачимо у здобувачів, які закінчували заклади повної загальної середньої освіти у 2021 році, тобто останній рік навчання пройшов дистанційно (пандемія COVID-19), результати оцінювання ЗНО значно гірші у порівнянні з оцінюванням ПЗСО. Навчання на першому курсі університету 2021/2022 навчального року відбувалось дистанційно – пандемія COVID-19 та повномасштабне вторгнення, окупація Херсону та частини Херсонської області, переміщення Херсонського національного технічного університету, переміщення викладачів та здобувачів не тільки по всій території України, а і по всьому світу – всі ці чинники, на жаль, вплинули на погіршення результатів навчання.

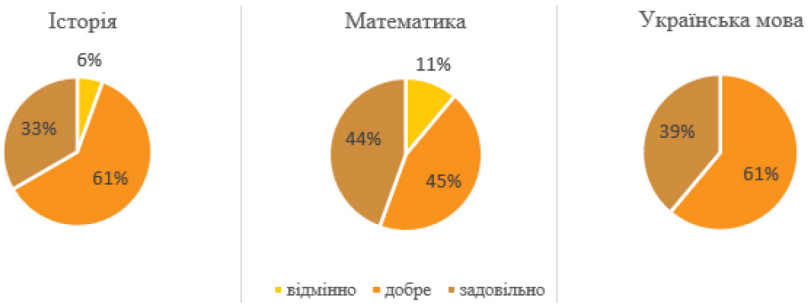


Рис. 4. Оцінювання ПЗСО 2021 рік вступу



Рис. 5. Оцінювання ЗНО 2021 рік вступу



Рис. 6. Оцінювання ХНТУ 2021 рік вступу

Також бачимо результати навчання у закладах вищої освіти найкраще відбивають результати оцінювання ЗНО (зовнішнє незалежне оцінювання) або НМТ (національний мультипредметний тест). Порівнявши рисунки 1 і 4, 2 і 5, 3 і 6, бачимо зниження результатів навчання та результатів незалежного оцінювання здобувачів вступу 2020 і 2021 років. Таку ж саму тенденцію ми спостерігаємо і за результатами навчання на перших курсах здобувачів вступу 2022, 2023 років.

Висновки

Дистанційне навчання потребує постійної комунікації зі здобувачами вищої освіти, що забезпечує сприятливе середовище для формування необхідних компетенцій майбутнім фахівцям. Повне дистанційне навчання погіршує його результати.

Якість навчання здобувачів інженерно-технічних спеціальностей залежить від ключових компетентностей, набутих у загальноосвітніх навчальних закладах, результати яких найкраще ілюструють незалежні оцінювання.

Список використаної літератури

1. Аннєнкова І. П. Критерії і показники якості освіти у ВНЗ. *Наука і освіта*. Одеса. 2011. № 8. С. 4–7.
2. Курило В. С. Моделювання системи критеріїв оцінки розвитку освіти в регіоні. *Педагогіка і психологія*. 1999. № 2. С. 35–39.
3. Концепція якості освіти. Освіта.UA. URL: https://osvita.ua/school/method/1342/ (дата звернення: 26.01.2025).
4. Соловей Ю. О. Моніторинг якості дошкільної освіти: навчально-методичний посібник. Черкаси, 2019. 118 с.
5. Гаращук О. В., Куценко В. І. Якісна освіта – інструмент сталого розвитку (зарубіжний досвід та українські реалії). *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2019. Випуск 23, частина 1. С. 49–55.

References

1. Annienkova I. P. Kryterii i pokaznyky yakosti osvity u VNZ. Nauka i osvita. Odesa. 2011, № 8, 4–7.
2. Kurylo V. S. Modeliuvannia systemy kryteriiv otsinky rozvytku osvity v rehioni. Pedahohika i psykholohiia. 1999, № 2, 35–39.
3. Kontseptsiia yakosti osvity. URL: https://osvita.ua/school/method/1342/ (data zvernennia: 26.01.2025).
4. Solovei Yu. O. Monitorynh yakosti doshkilnoi osvity: navchalno-metodychnyi posibnyk. Cherkasy, 2019, 118 s.
5. Harashchuk O. V., Kutsenko V. I. Yakisna osvita – instrument staloho rozvytku (zarubizhnyi dosvid ta ukrainski realii). Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. 2019, Vypusk 23, chastyna 1, 49–55.

UDC 621.357 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.33

D. P. THORZHEVSKY
Student at the Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0002-0455-1777

A. S. ZABALUEV
Assistant at the Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-9749-7599

D. YU. USHCHAPOVSKYI
PhD in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0002-2809-2774

V. I. VOROBYOVA
Doctor in Technical Sciences,
Head of the Department of Physical Chemistry Technology
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-7479-9140

G. S. VASYLIEV
Doctor in Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Electrochemical Productions Technology
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-4056-5551

O. V. LINYUCHEVA
Doctor in Technical Sciences,
Dean of the Chemical Technology Faculty
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0003-4181-5946

THE INFLUENCE OF ELECTROLYTE COMPOSITION ON THE CORROSION RESISTANCE OF NICKEL-BASED METAL-RESISTIVE COATINGS

This paper presents a study of the corrosion resistance of metal resistive nickel coatings and the influence of gloss-forming additives on it, which can be introduced into the electrolyte to improve the quality and uniformity of electroplated coatings.

Based on the conducted potentiodynamic polarization measurements and construction of corrosion diagrams, it has been shown that in a 3 % acetic acid solution, a 3 % sodium chloride solution, and a 3 % sodium chloride solution with the addition of 6 ml/l of acetic acid, the corrosion destruction of galvanic nickel deposits mainly occurs with cathodic control, and the limiting stage is, respectively, the stage of oxygen transport to the metal surface. It has been established that the corrosion destruction of nickel galvanic metal-resistive coatings in an alkaline copper-chloride solution for etching the conductive pattern of printed circuit boards occurs with mixed and predominant anodic control. It has been shown that due to the depassivating effect of inclusions of decomposition products of gloss-forming additives in the structure of nickel deposits, intensive destruction of the metal-resistive coating occurs in the environment of an alkaline copper-chloride solution for etching the conductive pattern of printed circuit boards. In the case of sulfur-free matte nickel deposits, contact with copper leads to a significant reduction in the corrosion rate, due to the possible stimulation

of passive film growth. This is also, to a much lesser extent, inherent in bright sulfur-containing coatings. It has been found that in order to apply corrosion-resistant nickel metal-resistive coatings, the use of sulforogenic surfactants, such as saccharin, should be limited.

Key words: *nickel plating, metal resistive coatings, acetic acid, sodium chloride, alkaline copper chloride etching solution, conductive pattern, corrosion resistance, passive film.*

Д. П. ТХОРЖЕВСЬКИЙ
студент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0002-0455-1777

А. С. ЗАБАЛУЄВ
асистент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-9749-7599

Д. Ю. УЩАПОВСЬКИЙ
кандидат технічних наук,
доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-2809-2774

В. І. ВОРОБЙОВА
доктор технічних наук,
завідувач кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7479-9140

Г. С. ВАСИЛЬЄВ
доктор технічних наук,
доцент кафедри технології електрохімічних виробництв
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4056-5551

О. В. ЛІНЮЧЕВА
доктор технічних наук,
декан хіміко-технологічний факультету
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4181-5946

ВПЛИВ СКЛАДУ ЕЛЕКТРОЛІТУ НА КОРОЗІЙНУ СТІЙКІСТЬ МЕТАЛОРЕЗИСТИВНИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

У даній роботі представлено дослідження корозійної стійкості металорезистивних нікелевих покриттів та впливу на неї добавок блискоутворювачів, які можуть вводитись в електроліт з метою підвищення якості та рівномірності гальванічних покриттів.

На основі проведених потенціодинамічних поляризаційних вимірювань та побудови корозійних діаграм показано, що у 3 % розчині оцтової кислоти, 3 % розчині хлориду натрію, 3 % розчині хлориду натрію з додавання 6 мл/л оцтової кислоти, корозійне руйнування гальванічних нікелевих осадів переважно відбувається з катодним контролем, а лімітуючою є, відповідно, стадія транспорту кисню до поверхні металу. Встановлено, що корозійне руйнування нікелевих гальванічних металорезистивних покриттів у лужному мідно-хлоридному розчині травлення струмопровідного рисунку друкованих плат відбувається зі змішаним та переважним анодним контролем. Показано, що за рахунок депасивуючого впливу включень продуктів розкладу блискоутворювачів в структуру нікелевих осадів відбувається інтенсивне руйнування металорезистивного покриття в середовищі лужного мідно-хлоридного розчину травлення струмопровідного рисунку друкованих плат. У випадку безсульфоровмісних

матових нікелевих осадів контакт із міддю призводить до значного зменшення швидкості корозії, через можливе ущільнення пасивної плівки. Це також, значно в меншій мірі, притаманне блискучим сульфоровмісним покриттям. Виявлено, що з метою нанесення корозійностійких нікелевих металорезистивних покриттів слід обмежити використання сульфорогенних поверхнево-активних добавок, таких, як сахарин.

Ключові слова: *нікелювання, металорезистивні покриття, оцтова кислота, натрію хлорид, лужний мідно-хлоридний розчин травлення, струмопровідний рисунок, корозійна стійкість, пасивна плівка.*

Formulation of the problem

Metal-resistive coatings are used in the technology of printed circuit board production in order to create a current-conducting pattern. In the production of printed circuit boards, metal-resistive coatings are usually deposited from metals such as tin and its alloys, less often nickel. These metals have high corrosion resistance and stable total and surface conductivity. In particular, nickel coatings have high mechanical strength and wear resistance, which increases the durability of components on the boards [1, 2]. Increasing the protective properties and reducing the cost of deposition such coatings will contribute to the further development of the electronic, radio engineering and aviation industries.

Analysis of the latest research and publications

Nickel coatings in the technology of printed circuit board production are deposited as a sublayer before depositing gold or palladium coatings in order to reduce the transition resistance, increase mechanical properties and corrosion resistance. It is also important to note that nickel coatings are a cheaper alternative to tin coatings, which makes it economically feasible to replace the latter in the technological process of printed circuit board production [1–3].

In order to improve the quality and uniformity of nickel coatings, brighteners, in particular saccharin, are introduced into electrolytes. The latter is a source of sulfur, which is incorporated into the coating structure during electrodeposition [4–6]. Saccharin, as an organic compound, can be incorporated into the coating structure both through physical adsorption of molecules and through electrochemical reduction to metal sulfides [7]. The concentration of saccharin in the electrolyte significantly affects the characteristics of the coatings. At low concentrations (< 2 g/l), saccharin contributes to the formation of thin, homogeneous coatings with improved mechanical properties, in particular, with a smaller number of defects and cracks. At the same time, at high concentrations (> 2,5 g/l), the coating can become porous due to oversaturation of the solution with saccharin, which reduces its mechanical strength and corrosion resistance [7]. The inclusion of sulfur through saccharin negatively affects the corrosion resistance of coatings. High sulfur content reduce the corrosion resistance of coatings due to the formation of galvanic pairs between different phases, in particular sulfides. This leads to localized corrosion and degradation of the coating [8]. Excessive increase in the concentration of saccharin leads to a deterioration in corrosion resistance due to the formation of a porous coatings [7].

Formulation of the purpose of the research

Thus, the purpose of this work is to study the influence of the electrolyte composition, in particular, the content of gloss-forming additives, on the corrosion resistance and protective properties of nickel metal-resistive coatings, as well as to assess the possibilities of their use as metal-resistive coatings in corrosive and aggressive environments, and, in particular, in conditions of etching of conductive patterns of printed circuit boards.

Presentation of the main research material

Research methodology. At the initial stage, nickel-based materials were studied, for this purpose foil electrodeposition was carried out. For this purpose, industrial electrolytes were selected, the composition of which is given in Table 1.

Table 1

Nickel plating electrolytes and foil electrodeposition modes

Electrolyte composition, g/dm³		
№ 1 (bright nickel plating on rack)	**№ 2 (bright nickel plating in the barrel)**	**№ 3 (matte nickel plating on rack)**
$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 250…300; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 40…60; H_3BO_3 – 30…40; Butynediol 35 % solution – 0.5…1.5 ml/l; Saccharin – 0,5…1	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 250…300; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 40…60; H_3BO_3 – 30…40; Saccharin – 2…6	$NiSO_4 \cdot 7H_2O$ – 250…300; $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ – 40…60; H_3BO_3 – 30…40
Electrolysis mode		
pH 4…4,5; t = 50 ± 3 °C; i = 2…3 A/dm²	pH 4…4,5; t = 50 ± 3 °C; i = 2…3 A/dm²	pH 4…4,5; t = 50 ± 3 °C; i = 2…3 A/dm²
Sulfur content in the galvanic deposit, wt.%		
0,074	0,240	0,010>

For the purpose of electrodeposition of nickel foil, samples of AISI 321 stainless steel were used as a working electrode (cathode). The thickness of the resulting nickel foil was about 50 μm. To determine the sulfur content in electrolytic deposits, X-ray fluorescence analysis was used using an express analyzer of the "EXPERT 3L". The results of determining the sulfur content in the foil are presented in Table 1.

Four solutions were used for polarization and corrosion tests: 3 % acetic acid (CH_3COOH); 3 % sodium chloride (NaCl); 3 % sodium chloride with the addition of 6 ml/l acetic acid; alkaline copper chloride solution for etching conductive patterns of printed circuit boards, the composition of which is close to that given in [3]. Distilled water and reagents of chemical grade were used to prepare the solutions. Due to the presence of volatile components in the tested solutions, such as ammonia and acetic acid, in order to create the same conditions for trapping the vapors of the corresponding compounds and entering air to the corrosive environment, gravimetric corrosion tests were carried out in desiccators with a capacity of 8 dm^3. A separate desiccator was used for each of the solutions. Three polypropylene glasses with a capacity of 150 ml were loaded into each desiccator. The area of electrodeposited nickel foil samples was 3,6 cm^2. In order to study the influence of the copper substrate on the corrosion of nickel coatings, a fragment of copper foil with a thickness of 0,5 mm and an area of 0,5 cm^2 was attached to the nickel foil sample. The duration of exposure of samples during corrosion tests in the studied environments was 24 hours. Weighing of samples after washing and drying with warm air was carried out on the AS 220.R2 analytical balances, with a weighing accuracy of up to 10^{-4} g. The values of corrosion rate established by the gravimetric method were converted into a current indicator of corrosion rate.

The corrosion behavior of galvanic nickel deposits was studied by linear polarization using a digital potentiostat PGstat 500n in a standard three-electrode electrochemical cell with an auxiliary platinum electrode. The potential scanning rate during the obtaining of potentiodynamic polarization curves was 2 mV/s. The potentials on the curves are given in the scale of a saturated silver-chloride electrode. Based on the obtained polarization curves, corrosion diagrams were built, from which the corrosion potential (E_{corr}) and the corrosion current density (i_{corr}) were determined. In order to assess the controlling reaction of the corrosion process, the values of the cathodic and anodic polarizations corresponding to i_{corr} were determined.

The study of the protective properties of metal-resistive coatings was carried out in an alkaline etching copper-chloride solution, which is used for chemical etching of conductive patterns of printed circuit boards. The samples used for the investigation were fragments of industrial printed circuit boards that had undergone the stages of preliminary galvanic copper plating and photoresist application on the blank areas. Nickel metal-resistive coatings with a thickness of 9 μm were electrodeposited into the photoresist windows on the conductive pattern after galvanic copper plating. The morphology of the resulting metal-resistive coatings on the conductive pattern was studied using an optical metallographic microscope MIM-7 equipped with a digital camera SIGETA USMOS08000KPB in the ToupView software.

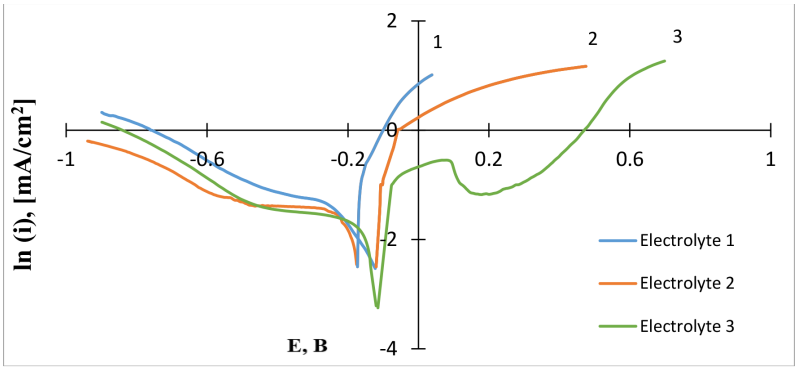
Results of experimental studies. In order to study the corrosion behavior of galvanic nickel deposits, polarization measurements were carried out, on the basis of which corrosion diagrams were constructed, which are presented in Fig. 1, and the main electrochemical parameters of the corrosion process were determined (Table 2).

In general, from Fig. 1 *a*, *b*, *c*, and Table 2 it is seen that in acetic acid and sodium chloride solutions, corrosion destruction of bright galvanic nickel deposits (obtained from electrolytes № 1, № 2) mainly occurs with cathodic control, and the limiting stage is the stage of oxygen transport to the metal surface. For matte nickel, the control is mixed. In contrast, in an alkaline copper-chloride etching solution (Fig. 1. *d*), corrosion destruction of bright and matte nickel foil occurs mainly with mixed and anodic control. Thus, the high passivation ability and the presence of a dense passive film, which is present precisely on matte nickel deposits obtained from electrolytes without gloss formers (saccharin), make the main contribution to the metal-resistive properties of the coatings as a whole.

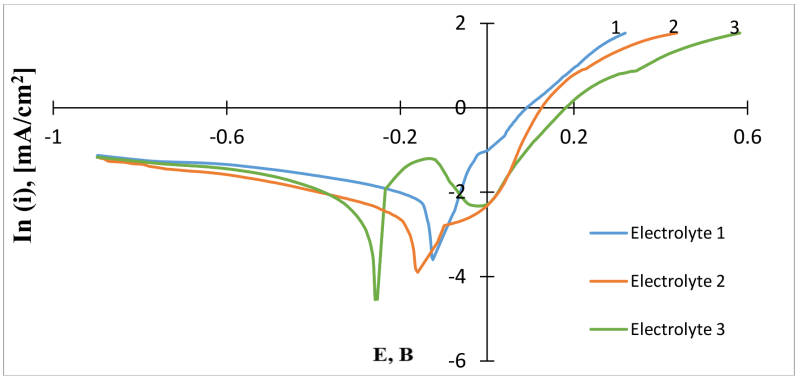
Comparison of the results of determining the corrosion rate by the gravimetric method and the polarization curve method (based on Fig. 1) shows approximately the same susceptibility of nickel foil samples to corrosion destruction (Fig. 2). Higher values of corrosion rates determined from polarization curves are explained by the influence of the potential scanning rate on the course of the polarization curve. In general, it is seen that in NaCl solution the corrosion rate of the studied nickel foil samples is the lowest and almost the same. In solutions containing acetic acid, as well as in alkaline copper chloride solution, the corrosion rate for bright nickel foil samples (obtained from electrolytes № 1 and № 2) was significantly higher than for matte sulfur-free foil (electrolyte № 3).

In addition to nickel foil samples, in order to simulate the presence of nickel metal resist on the surface of the conductive pattern of the printed circuit board, gravimetric corrosion tests were carried out for galvanic couples, which were created from fragments of nickel and copper foil. Comparing the data in Fig. 2 and 3, the following conclusions can be made. In acetate-containing solutions and sodium chloride solutions, the presence of contact between nickel and copper in the studied corrosive environments generally causes a decrease in the corrosion rate. Such an inhibitory effect of contact with copper can be explained as follows. On the one hand, copper, as a more electropositive metal, can impose its potential and cause the compaction of the passive film on nickel, which will mainly concern matte sulfur-free foil. On the other hand, the possible copper-stimulated dissolution of the bright foil at the initial point in time can cause blocking of the metal surface with poorly soluble corrosion products, and, as a result, inhibit the process of corrosion destruction. In an alkaline copper-chloride etching solution, copper can generally act as a protector – creating cathodic protection for nickel.

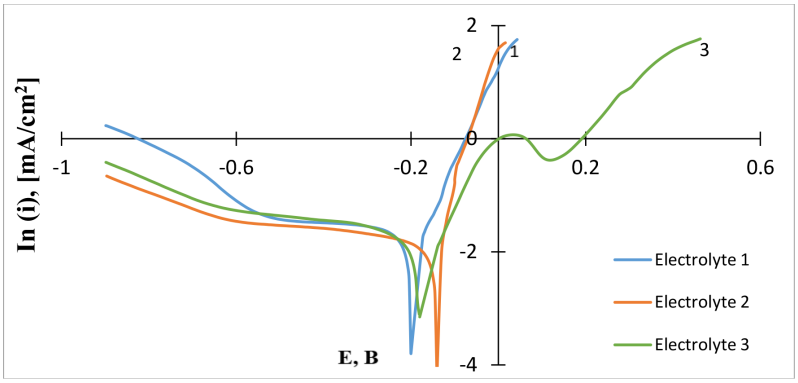
Nickel coatings were electrodeposited onto the surface of the conductive pattern of printed circuit boards, after which the conductive pattern was etched in an alkaline copper chloride solution in order to test the metal-resistive properties of the studied coatings (Fig. 4). It was found that when electrodepositing bright nickel coatings obtained from electrolytes



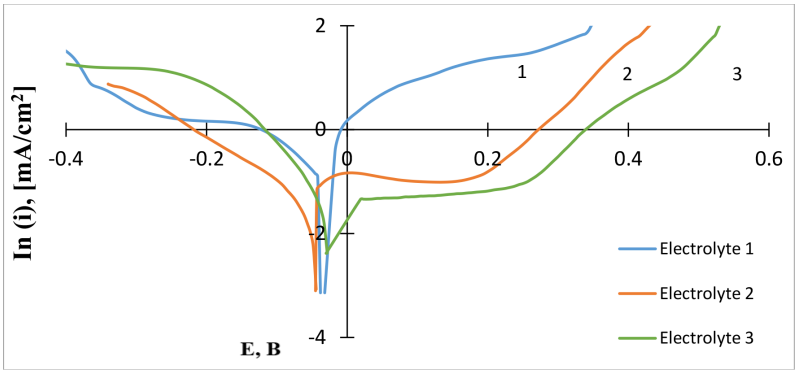
a



b



c



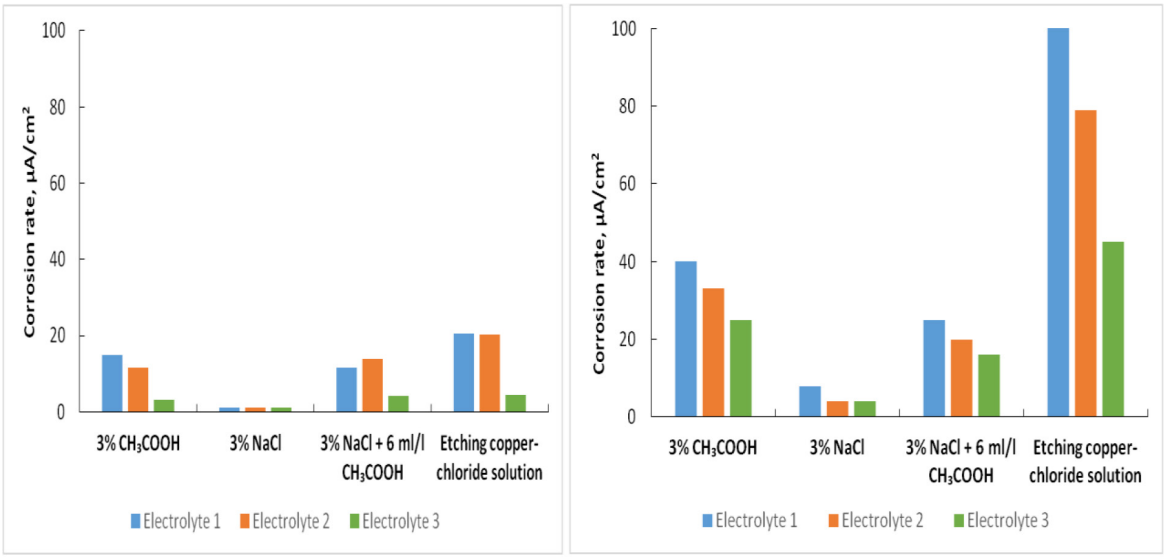
d

Fig. 1. Corrosion diagrams for the studied nickel foil samples in: *a* – 3 % CH_3COOH; *b* – in 3 % NaCl; *c* – 3 % NaCl with the addition of 6 ml/l CH_3COOH; *d* – in alkaline copper chloride etching solution

Table 2

Electrochemical parameters of corrosion processes for nickel foil samples

Solution	№ electrolyte	Corrosion current, lg(i_{corr}), [mA/cm²]	Corrosion potential, E_{corr}, V	ΔE_a, V	ΔE_k, V
3 % CH_3COOH	1	–1,4	–0,173	0,010	0,177
	2	–1,48	–0,120	0,008	0,130
	3	–1,6	–0,120	0,020	0,110
3 % NaCl	1	–2,1	–0,120	0,035	0,080
	2	–2,4	–0,160	0,080	0,090
	3	–2,4	–0,253	0,010	0,060
3 % NaCl + 6 ml/l CH_3COOH	1	–1,6	–0,198	0,020	0,060
	2	–1,7	–0,130	0,008	0,080
	3	–1,8	–0,180	0,040	0,080
Etching copper-chloride solution	1	–0,8	–0,040	0,008	0,008
	2	–1,1	–0,019	0,060	0,030
	3	–1,35	–0,050	0,060	0,020



a *b*

Fig. 2. The influence of the composition of the electrolyte for the deposition of nickel resist on its corrosion resistance, determined by gravimetric (*a*) and the method of corrosion diagrams (*b*)

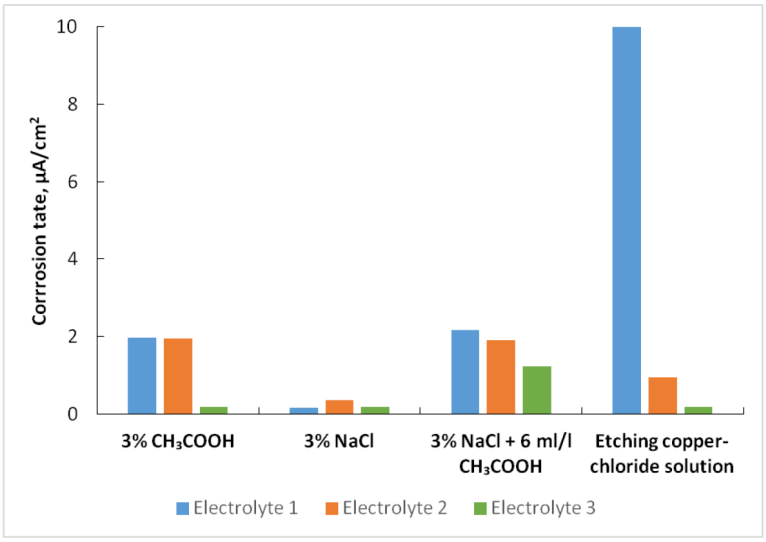


Fig. 3. Corrosion rate values of nickel foil samples during the formation of galvanic couple with copper, obtained by the gravimetric method

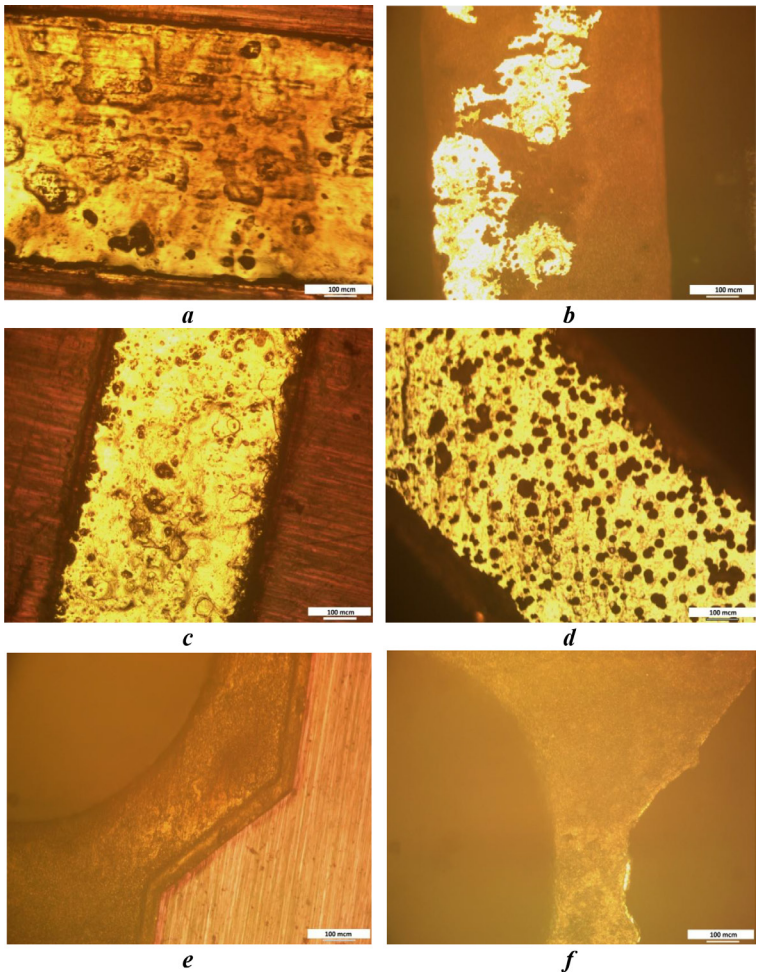


Fig. 4. Photographs of fragments of a conductive pattern with an electrodeposited nickel coating before etching in an alkaline copper chloride solution (*a*, *c*, *d*) and after etching (*b*, *d*, *e*). The coatings were deposited from electrolytes (according to Table 1): *a*, *b* – № 1; *c*, *d* – № 2; *d*, *e* – № 3

№ 1, № 2 (Table 1), partial destruction of metal resists occurs before complete etching of copper from the blank areas of the board. When using matte nickel sulfur-free coatings from electrolyte No. 3, the corresponding resist allows recreate a high-quality conductive pattern. A more detailed result of the testing of metal-resistive properties can be seen in the photo images of the surface morphology of conductive pattern with electrodeposited resistive coatings (Fig. 4). In fact, the corresponding results are consistent with the results of the corrosion rate determination. Thus, the most stable is the metal resist from matte coating deposited from electrolyte № 3, in second place is the metal resist obtained from electrolyte № 2, and in third place – from electrolyte № 1. Taking into account the sulfur content in the coatings, it turns out that with an increase in the content of the latter in the foil from 0,074 wt.% (electrolyte № 1) to 0,24 wt.% (electrolyte № 2) the corrosion rate of the foil, on the contrary, decreases. However, the corresponding sulfur contents in the foil exceed the critical permissible value, ensuring complete disruption of the passive film on nickel.

Conclusions

During the research of corrosion resistance of galvanic nickel coatings, the following was established. The use of electrolytes with the addition of saccharin 0,5...6 g/l for the deposition of nickel metal-resist leads to the formation of deposits with a sulfur content of 0.074...0.24 wt.% and low corrosion resistance (corrosion rate in alkaline copper-chloride etching solution 20 μA/cm^2). The use of electrolytes without sulfur-containing additives allows obtaining coatings with a sulfur content of up to 0.01 wt.%. The corrosion rate of these coatings in alkaline copper-chloride etching solution is the lowest and is about 3 μA/cm^2. Thus, electrodeposition of metal-resistive nickel coatings from electrolytes that do not contain sulfurogenic gloss-forming additives is important for achieving their high corrosion resistance, in particular, in alkaline copper-chloride etching solution.

Bibliography

1. WellPCB, “Conformal Coating in PCB Manufacturing”. URL: https://www.wellpcb.com/blog/pcb-manufacturing/conformal-coating-in-pcb-manufacturing/
2. ELEPCB, “How to Choose the Right PCB Conformal Coating”. URL: https://www.elepcb.com/blog/choose-the-right-pcb-conformal-coating/
3. Яцюк Л. А., Косогін О. В., Ущаповський Д. Ю., Лінючева О. В., Фатєєв Ю. Ф. Технологія нанесення неметалевих покриттів та виробництво плат друкованого монтажу [Електронний ресурс] : підручник. *КПІ ім Ігоря Сікорського. Вид-во «Політехніка»*, 2018, 330 с.
4. Ushchapovskiy D. Yu., Byk M. V., Linyucheva O. V., Frolenkova S. V., Red’ko R. M., Yakubenko V. V. Corrosion resistance of bright nickel coatings in the vapor of acetic acid. *Materials Science*, 55, 2020, pp. 656–663.
5. Tabakovic I., Riemer S., Tabakovic K., Sun M., Kief M. Mechanism of saccharin transformation to metal sulfides and effect of inclusions on corrosion susceptibility of electroplated CoFe magnetic films. *Journal of The Electrochemical Society*, 2006, 153(8), pp. 586–593.
6. Ushchapovskiy D. Y., Liniucheva O. V., Kushmyruk A. I., Redko R. M., Pidvashetskyi H. Yu. Comparative study of corrosion activity of bright and matte nickel coatings in solutions and vapor of acetic acid. *Materials Science*, 58, 2023, pp. 540–547.
7. George, J., Rantschler, J., Bae, S.-E., Litvinov, D., & Brankovic, S. R. Sulfur and saccharin incorporation into electrodeposited CoFe alloys: Consequences for magnetic and corrosion properties. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(9), 2008, pp. D589–D594.
8. Marcus P., Teissier A., Oudar J. The influence of sulphur on the dissolution and the passivation of a nickel-iron alloy. I. Electrochemical and radiotracer measurements. *Corrosion Science*, 24, 1984, pp. 259–268.

References

1. WellPCB, “Conformal Coating in PCB Manufacturing”. https://www.wellpcb.com/blog/pcb-manufacturing/conformal-coating-in-pcb-manufacturing/
2. ELEPCB, “How to Choose the Right PCB Conformal Coating” https://www.elepcb.com/blog/choose-the-right-pcb-conformal-coating/
3. Yatsyuk L. A., Kosohin O. V., Ushchapovskyi D. Yu., Linyucheva O. V., Fatyeyev Yu. F. (2018)Tekhnolohiya nanesennya nemetalevykh pokryttiv ta vyrobnytstvo plat drukovanoho montazhu [Elektronnyy resurs] : pidruchnyk [Technology of application of non-metallic coatings and production of printed circuit boards [Electronic resource]: textbook]. *KPI im Ihorya Sikors'koho. Vyd-vo “Politekhnika”*, S. 330 (in ukr) https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24954
4. Ushchapovskiy D. Yu., Byk M. V., Linyucheva O. V., Frolenkova S. V., Red’ko R. M., Yakubenko V. V. (2020) Corrosion resistance of bright nickel coatings in the vapor of acetic acid. *Materials Science*, 55, pp. 656–663. https://doi.org/10.1007/s11003-020-00356-7
5. Tabakovic I., Riemer S., Tabakovic K., Sun M., Kief M. (2006). Mechanism of saccharin transformation to metal sulfides and effect of inclusions on corrosion susceptibility of electroplated CoFe magnetic films. *Journal of The Electrochemical Society*, 153(8), 586–593. https://doi.org/10.1149/1.2207821
6. Ushchapovskiy D. Y., Liniucheva O. V., Kushmyruk A. I., Redko R. M., Pidvashetskyi H. Yu. (2023) Comparative study of corrosion activity of bright and matte nickel coatings in solutions and vapor of acetic acid. *Materials Science*, 58, 540–547. https://doi.org/10.1007/s11003-023-00696-0
7. George, J., Rantschler, J., Bae, S.-E., Litvinov, D., Brankovic, S. R. (2008). Sulfur and saccharin incorporation into electrodeposited CoFe alloys: Consequences for magnetic and corrosion properties. *Journal of The Electrochemical Society*, 155(9), D589–D594. https://iopscience.iop.org/article/10.1149/1.2948377/pdf
8. Marcus P., Teissier A., & Oudar J. (1984). The influence of sulphur on the dissolution and the passivation of a nickel-iron alloy. I. Electrochemical and radiotracer measurements. *Corrosion Science*, 24, 259–268. https://doi.org/10.1016/0010-938X(84)90012-X

УДК 621.382.2 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.34

О. М. ФРОЛОВ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автоматики та електроустаткування
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0003-2186-9488

С. Р. СЄЛІВЕРСТОВА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання
і засобів автоматики
Херсонська державна морська академія
ORCID: 0000-0003-1015-1593

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ДОРОЗГОНУ ФОСФОРУ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ДРЕЙФОВИХ N-P-N ТРАНЗИСТОРІВ

Існує кілька видів технологій біполярних транзисторів, серед яких більшість займають технології виробництва дрейфових n-p-n транзисторів. Однією з основних характеристик біполярних транзисторів є коефіцієнт підсилення струму в схемі включення із загальним емітером, і залежить від товщини бази. Через допустимий технологічний розкид глибини дифузійних шарів на різних партіях пластин виходить різна величина товщини бази, що суттєво впливає на коефіцієнт підсилення транзисторів за струмом. Навіть при застосуванні одних і тих же технологічних режимів розкид отриманих коефіцієнтів посилення на різних партіях пластин може відрізнятись в 7–9 разів.

В якісній продукції розкид параметрів і характеристик є мінімальним. При використанні дискретних елементів це спрощує налагодження електронної апаратури у споживача, тому що не вимагає індивідуального налаштування кожного апарату. При застосуванні біполярних транзисторів у мікросхемах зменшення розкиду коефіцієнтів підсилення дозволяє зменшити величину питомого опору і товщину епітаксійних шарів, що призводить до підвищення частотно-імпульсних властивостей, а також дозволяє зменшити як розміри окремих транзисторів, так і розміри кристалів.

Для отримання дрейфових n-p-n транзисторів з малим розкидом коефіцієнтів підсилення було запропоновано застосувати додаткову технологічну операцію – дорозгону фосфору. В технологічному процесі після дифузії фосфору для формування емітера отримують зменшені значення коефіцієнтів підсилення, а після їх вимірювання проводять операцію дорозгону фосфору при температурах менших температури дифузії при формуванні емітера. Час процесу визначається за графіками залежності, складеними на основі експериментів. Для різних видів і типів біполярних транзисторів застосовуються різні режими формування дифузійних шарів. Режими формування базових областей відрізняються дозами домішки, часом і температурою процесу дифузії, параметрами отриманих дифузійних шарів. В результаті оптимальні режими технологічної операції дорозгону фосфору відрізнятимуться.

Ключові слова: *біполярний транзистор, коефіцієнт підсилення.*

A. N. FROLOV
Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department of Automation
and Electrical Equipment
National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov
ORCID: 0000-0003-2186-9488

S. R. SELIVERSTOVA
Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
Assistant Professor at the Department of Operation
of Ship Electrical Equipment and Automation Systems
Kherson State Maritime Academy
ORCID: 0000-0003-1015-1593

DETERMINATION OF OPTIMUM MODES FOR PHOSPHORUS ADDITIONAL DISTRIBUTION IN THE PRODUCTION OF DRIFT N-P-N TRANSISTORS

There are several types of bipolar transistor technologies, with drift n-p-n transistor technologies occupying the majority. One of the main characteristics of bipolar transistors is the current gain in a common emitter circuit, and it depends on the thickness of the base. Due to the permissible technological variation in the depth of the diffusion layers,

different batches of wafers have different base thicknesses, which significantly affects the current gain of the transistors. Even when using the same technological modes, the variation of the obtained gain on different batches of wafers can differ by a factor of 7–9.

In high-quality products, the variation in parameters and characteristics is minimal. When using discrete elements, this simplifies the debugging of electronic equipment at the consumer's site, as it does not require individual adjustment of each device. When bipolar transistors are used in microcircuits, reducing the spread of gain makes it possible to reduce the resistivity and thickness of epitaxial layers, which leads to an increase in frequency-pulse properties, and also reduces both the size of individual transistors and the size of crystals.

In order to obtain drift n-p-n transistors with a small spread of gain, it was proposed to apply an additional technological operation – phosphorus doping. In the technological process, after the diffusion of phosphorus to form the emitter, reduced values of the gain are obtained, and after measuring them, the phosphorus is re-accelerated at temperatures lower than the diffusion temperature during the formation of the emitter. The process time is determined by the dependence graphs based on experiments. Different modes of diffusion layer formation are used for different types and types of bipolar transistors. The modes of formation of the base regions differ in dopant doses, time and temperature of the diffusion process, and parameters of the resulting diffusion layers. As a result, the optimal modes of the technological operation of phosphorus recovery will differ.

Key words: *bipolar transistor, gain coefficient.*

Постановка проблеми

Методи та основні технологічні операції виготовлення дрейфових транзисторів широко описані у технічній літературі [1–3]. Їх виготовляють на одношарових епітаксійних структурах n-n+- типу. В біполярних мікросхемах роль підкладки n^+-типу виконує захований шар n^+-типу. А основні технологічні операції формування дрейфового транзистора включають термічне окиснення, фотолітографію під базові області, формування базових областей шляхом введення домішку *p*-типу з наступною термічною дифузією, фотолітографію під емітер, формування емітерних областей шляхом введення домішку n^+-типу, фотолітографію для розкриття вікон до дифузійних областей емітера, бази та колектора, вакуумне нанесення шару металу та фотолітографію по металу. Зазвичай в якості домішки *p*-типу для формування базових областей застосовують бор, а в якості домішки *n*-типу застосовують фосфор.

У ряді випадків для отримання найбільш оптимального поєднання параметрів та характеристик транзисторів формують дві базові області (активну та пасивну) з різним вмістом домішки та різною глибиною *p–n* переходів [4], для чого додається ще одна операція фотолітографії та операція введення домішки *p*-типу з іншою дозою. У випадку використання біполярних транзисторів в біполярних мікросхемах вони створюються таким же набором технологічних операцій [1, 5]. У сучасних умовах вимоги до сукупності параметрів та характеристик транзисторів стали жорсткішими.

Наприклад, досить добрі за сукупністю параметрів та характеристик транзистори серії КТ3102 мають великий розкид за коефіцієнтами підсилення, – від 100 од. до 1000 од. і, відповідно, різні допустимі напруги пробою колектор-емітер U_{CE0}. При цьому їх розбивають на різні групи (А, Б, В, Г). Однак навіть у групах розкид транзисторів за коефіцієнтом підсилення перевищує ±40 %.

Наприклад, у *n-p-n* транзисторів біполярних мікросхем серії 155 допустимий діапазон коефіцієнтів підсилення транзисторів становив від 15 од. до 90 од. Як правило, значення коефіцієнта підсилення виробів одного виду залежать від товщини бази транзистора, при меншої величини товщини бази буде більшим коефіцієнт підсилення. Також, від товщини бази залежать гранична частота і максимально допустимий струм колектора [6, 7].

Таким чином, великий розкид по коефіцієнту підсилення вказує на значний розкид і за іншими параметрами і характеристиками транзисторів, що не дозволяє при їх застосуванні повністю використовувати можливості транзисторів, а в ряді випадків вимагає додаткового налаштування радіоелектронної апаратури.

Великий розкид за коефіцієнтами посилення пояснюється впливом різних факторів (тиск, температура, склад навколишнього середовища, склад паро – газового середовища, в якому проводиться термічні операції, зміна реактора або дифузійної печі) на процеси дифузії, і, відповідно, допусками на глибини *p-n* переходів, наведені в нормативних документах атестації виробництва. Так, у [8] допуск по відхиленню глибини *p-n* переходу колектор-база, створюваного шляхом іонного легування бором з подальшим термічним відпалом або розгонкою домішки становить ±10 %, а допуск по відхиленню глибини *p-n* переходу емітер-база, створюваного шляхом термічної дифузії домішку фосфору становить ±20 %.

Наприклад, для біполярних ТТЛ мікросхем типові значення середньої глибини *p–n* переходу колектор-база становлять близько 1,8 мкм, і глибини p-n переходу емітер-база близько 1,0 мкм. При цьому у зазначених допусках товщина бази буде різнитися у 2,8 разів. Враховуючи, що в першому наближенні коефіцієнт підсилення обернено пропорційний квадрату товщини бази виходить, що допустимий розкид за коефіцієнтом підсилення може дорівнюватиме 7–9 разів.

Напруга пробою транзистора, включеного із загальним емітером U<SUB>CE0<\SUB> за лавинним механізмом пробою для n-p-n транзисторів залежить від величини коефіцієнта підсилення і визначається за формулою [5, 6]:

$$U_{CEO} = \frac{U_{CBO}}{\sqrt[4]{h_{21E.\max}}}; \quad (1)$$

де U_{CBO} – напруга лавинного пробою *p–n* переходу колектор-база; $h_{21\max}$ – максимальний коефіцієнт посилення струму.

При крайніх значеннях коефіцієнтів підсилення величина напруги пробою відрізнятиметься приблизно 1,7 разів. Це призводить до того, що для забезпечення необхідного значення напруги пробою величину питомого опору епітаксійного шару необхідно застосовувати зі значним запасом. Підвищення опору епітаксійного шару приводить до підвищення опору області колектора транзистора, а це призводить до зменшення граничної частоти, зменшення максимально-допустимого струму колектора і підвищення ступеню нагрівання транзистора при протіканні струму.

За сучасних вимог до параметрів транзисторів, а також до розмірів транзисторів у біполярних мікросхемах необхідно обмежувати величину питомого опору епітаксійного шару. Крім того, в сучасних мікросхемах для зменшення струмів споживання необхідні значення коефіцієнтів посилення можуть становити кілька сотень одиниць.

Якщо використовувати типову технологію при необхідності обмеження транзисторів а по коефіцієнтам підсилення не більш ніж 2–2,5 рази, відразу після проведення операцій дифузії фосфору, на різних партіях пластин, виготовлених у різні дні, частина пластин має достатні запаси за напругою пробою, але недостатні значення коефіцієнтів посилення. Інша частина має достатні коефіцієнти посилення та величину напруги пробою. А третя частина пластин має високі коефіцієнти підсилення, але напруги пробою нижче потрібної, – це вже невиправний брак.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Для виключення невиправного браку запропоновано технічне рішення, яке передбачає заздалегідь формувати транзистори з малим коефіцієнтом підсилення, але з достатнім запасом по напрузі пробою, а після вимірювання параметрів на тестових структурах проводити операцію дорозгону фосфору в області емітера до необхідного значення. При цьому температура дорозгону фосфору повинна бути меншою за температуру дифузії фосфору при формуванні емітерних областей, а час дорозгону повинен бути більшим, щоб більш точно отримувати необхідні значення коефіцієнтів посилення. Крім того, менша температура цей операції практично не впливає на розподіл домішку в базової області за різних значень коефіцієнтів дифузії бору та фосфору, тобто не приводить до зміни напруги пробою *p-n* переходу колектор–база (U_{CBO}).

Для зменшення впливу етапів завантаження та вивантаження пластин у робочу зону дифузійної печі (порядку 5 хв.) оптимальний час операції дорозгону від мінімальних значень коефіцієнтів посилення до заданих значень має бути не менше 20–40 хвилин.

Прямий розрахунок режимів дорозгону фосфору досить складний, тому що крім різної концентрації домішки в базової області дрейфового транзистора є ще й різні вимоги до величини коефіцієнта підсилення для різних виробів. Також, необхідно враховувати додаткові ефекти, які відбуваються при дифузії фосфору. Оскільки, при створенні емітерів поверхнева концентрація фосфору створюється досить високою, проявляється ефект прискорення дифузії [9], що враховується під час розрахунків запровадженням коефіцієнта прискорення дифузії в розрахункову формулу. Однак при подальших технологічних операціях при високій температурі, поверхнева концентрація фосфору змінюється, що призводить до зміни цього коефіцієнта прискорення.

Кількість іонізованих атомів фосфору в дифузійному шарі не дорівнює кількості впровадженої домішки [9, 10], а залежить від поверхневої концентрації та від глибини шару.

У цьому випадку найбільш доцільним методом визначення режимів дорозгону фосфору є метод фізико-статистичного аналізу, в якому за експериментальними даними визначаються і математично описуються основні залежності.

Слід враховувати, що для різних виробів базові області транзисторів створюються різної дозою домішки та з різними режимами формування цих областей як по часу дифузії, так й по температурі процесу. Тому, при застосуванні однакової температури процесу дорозгону фосфору на виробах з різними режимами формування базових областей, час отримання необхідних коефіцієнтів підсилення буде відрізнятися.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є визначення режимів процесу дорозгону фосфору при виготовлення дрейфових *n-p-n* транзисторів для отримання малого розкиду коефіцієнтів підсилення.

Викладення основного матеріалу дослідження

Експериментальні дослідження впливу режимів дорозгону фосфору для *n-p-n* транзисторів проводилися на приладах, що серійно випускаються. Це дозволяє набрати велику кількість даних та провести відповідну обробку цих даних.

Для приладів (тип 1) базова область створювалася шляхом іонного легування бором дозою 70 мкКл/см^2 з наступною операцією термічного перерозподілу домішки (розгонка) при температурі 1150 °С. Вимоги до коефіцієнта посилення транзистора – від 70 од. до 160 од. Типове значення – 110–140 од.

Для приладів (тип 2) базова область створювалася шляхом іонного легування бором дозою 17 мкКл/см^2 з наступною термічною розгонкою домішки при температурі 1150 °С. Через порівняно невелику дозу поверхнева концентрація домішку в базовій області виходить невеликою. Для усунення можливого ефекту отримання бар'єру Шоттки на базовому контакті застосовувалося підлегування областей під контакти до бази шляхом додаткової дифузії бору. Вимоги до коефіцієнта посилення транзистора – від 140 од. до 350 од. Типове значення – 250–280 од.

Для приладів (тип 3) базова область створювалася шляхом іонного легування бором дозою 4 мкКл/см^2. Для цього типу приладів також проводилося підлегування контактних областей до бази шляхом додаткової дифузії бору. Вимоги до коефіцієнта посилення транзистора – від 240 од. до 500 од. Типове значення – 350 од. ±10 %.

Емітерні області всіх цих типів приладів створювалися шляхом дифузії фосфору за температури процесу 1040 °С.

Після дифузії фосфору проводилася фотолітографія для відкриття вікон у маскувальному шарі окислу кремнію до емітерів, баз та колекторів. Вимірювання електричних параметрів транзисторів, таких як коефіцієнти посилення (h_{21E}), напруги пробою (U_{CEO}) проводилися на тестових структурах, розташованих на краях кристалів з приладами. Вимірювання проводили на установці Л2-56 (ПНХТ-2). Атестована похибка приладу не перевищує ±5 %.

У цей роботі досліджувалося вплив часу дорозгонки при температурі 950 °С на зміну коефіцієнтів підсилення. Процес дорозгонки фосфору проводився в дифузійній печі. З метою уникнення зайвої операції фотолітографії, був застосований такий паро – газовий режим: перші 5 хвилин сухий кисень, решта часу сухий аргон. Для видалення шару оксиду кремнію, що з'явився, пластини занурювалися в *p*-травник на 5–10 с, а контроль видалення тонкого оксиду з вікон проводився по початку скочування *p*-травника зі зворотного боку пластини. Після цього проводилося вимірювання отриманих електричних параметрів.

Отримані залежності коефіцієнтів підсилення транзисторів від режимів процесу дорозгонки фосфору для різних партій пластин наведено рисунку 1.

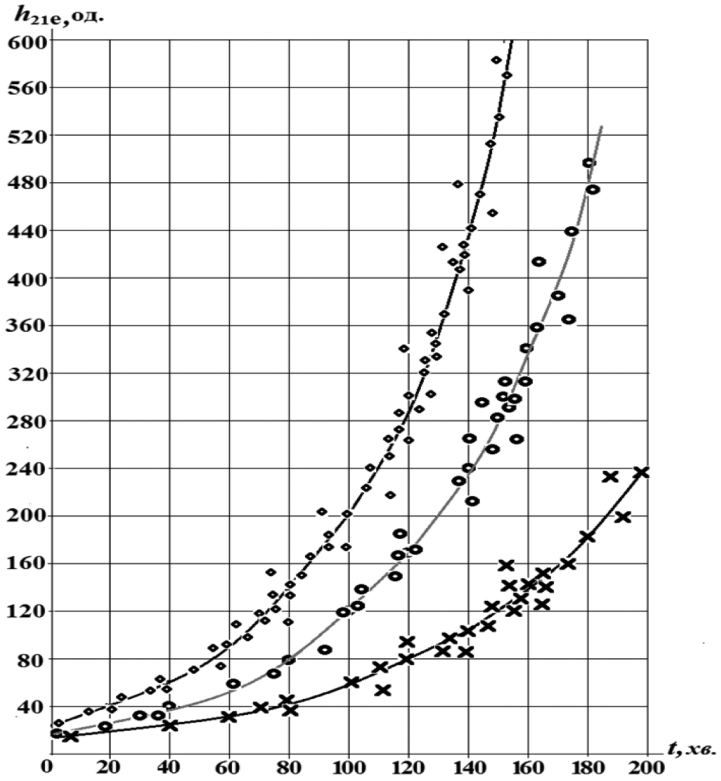


Рис. 1. Залежність коефіцієнтів підсилення дрейфових *n-p-n* транзисторів від часу дорозгону фосфору при температурі 950 °С
***x* – при дозі домішку бора в базі – 70 мкКл/см^2; ○ – при дозі домішку бора в базі – 17 мкКл/см^2;**
◊ – при дозі домішку бора в базі – 4 мкКл/см^2

Згідно графічної залежності коефіцієнтів посилення транзисторів від часу дорозгонки фосфору достатньо добре описується виразом:

$$h_{21E} = A \cdot e^{\alpha t}; \quad (2)$$

де: h_{21E} – коефіцієнт підсилення транзистора, од.; A та α – коефіцієнти пропорційності; t – час процесу дорозгонки (хвилин).

Для вказаних залежностей коефіцієнтів підсилення транзисторів були отримані наступні вирази:

– для приладів (тип 1 – доза бора 70 мкКл/см^2): $h_{21E} = 13{,}2 \cdot e^{0{,}0148 \cdot t}$;
– для приладів (тип 2 – доза бора 17 мкКл/см^2): $h_{21E} = 19{,}1 \cdot e^{0{,}0181 \cdot t}$;
– для приладів (тип 3 – доза бора 4 мкКл/см^2): $h_{21E} = 27{,}9 \cdot e^{0{,}0197 \cdot t}$.

Обробка отриманих даних показала залежність коефіцієнтів пропорційності (A та α) від дози домішку бора, яка застосована для формування бази дрейфового транзистора.

Залежність показника ступеню (α) від дози домішку бора визначається формулою:

$$\alpha = \frac{1}{Q^{0,7} + 48}. \quad (3)$$

А залежність коефіцієнта пропорційності (А) від дози домішку бора визначається формулою:

$$A = Q^{-0.26}; \quad (4)$$

де: Q – доза домішку в базової області, мкКл/см^2.

Використання отриманих залежностей дозволяє досить просто визначати необхідний час дорозгону при температурі 950 °С по формулі:

$$\Delta t = \frac{\ln\left(\frac{h_{21E(2)}}{h_{21E(1)}}\right)}{\alpha}; \quad (5)$$

де: $h_{21E(1)}$ – коефіцієнт підсилення після формування емітера; $h_{21E(2)}$ – потрібний коефіцієнт підсилення після процесу дорозгону; α – коефіцієнт пропорційності, якій залежить від дози домішку в базової області транзистора за виразом (3).

Висновки

Встановлено, що залежність коефіцієнта посилення від часу дорозгону проходить по закону, який близький до експоненти з відповідними коефіцієнтами. Коефіцієнти пропорційності, які визначено для розрахунків коефіцієнтів підсилення транзисторів від часу дорозгону, самі залежать від дози домішки бору, яка застосовується для формування активної бази дрейфових *n-p-n* транзисторів.

Застосування процесу дорозгону фосфору після створення емітерів планарних дрейфових *n-p-n* транзисторів дифузією фосфору дозволяє зменшити розкид коефіцієнтів підсилення на пластинах різних партій з 7–9 разів до 2–2,5 разів. Що дозволяє повністю виключити невиправний брак пластин з напругою пробою менше необхідних значень і значно підвищує вихід придатних.

Зменшення розкиду коефіцієнтів підсилення дозволяє знизити запас на питомий опір епітаксійного шару. Це призводить до підвищення частотних властивостей. Як наслідок, зменшуються розміри кристалів мікросхем та дискретних транзисторів.

Список використаної літератури

1. Прищепа М. М., Погребняк В. П. Мікроелектроніка: в 3 ч. Ч. 1. Елементи мікросхемотехніки: навч. посіб. Київ : Вища школа, 2006. 431 с.

2. Готра З. Ю. Технологія електронної техніки: навч. посіб. у 2 т. Т. 1. Львів : Львівська політехніка, 2010. 888 с.

3. Михаліченко П. Є., Фролов О. М., Надточий А. В. та ін. Оперативний розрахунок елементів мікросхем та напівпровідникових приладів: монографія. / за ред. П. Є. Михаліченко. Миколаїв : Іліон, 2024. 188 с.

4. Спосіб виготовлення високочастотних біполярних *n-p-n* транзисторів. Деклар. пат. № 33442 А Україна. HOIL 7/34, опубл. 15.02.2001. Бюл. № 1.

5. Richard S. Muller, Theodore I. Kamins, Mansun Chan. Device electronics for integrated. [Electronic resource] Circuits-John Wiley & Sons, 2002. 538 p. https:// document/733331153/Richard-S-Muller-Theodore-I-Kamins-Mansun-Chan-Device-Electronics-for-Integrated-Circuits-John-Wiley-Sons-2002

6. Sze S. M. Semiconductor Devices, physics and technology: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd, 2002. 574 p.

7. Ніколайчук Г.П. Фізичні основи напівпровідникових приладів [Електронний ресурс] : навч. посіб. Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2023. 112 с. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64176

8. GhST 11 20.9903. Mikroskhemy integhraljni ta napivprovidnykovi prylady. Systema operacijnogho kontrolju u procesi vyrobnyctva. Tekhnichni vymoghy do tekhnologhichnogho procesu pid chas atestaciji vyrobnyctva. – 65 p.

9. Maekava S., Oshida F. Diffusion of boron in silicon. *J. Phys.Soc. of Japan*. 1967, v. 19, № 3. pp. 253–257.

10. Tsai C.C.J. Shallow phosphorus diffusion profiles in silicon. *Proc. IEEE*. 1969. v. 57, № 9. pp. 1499–1506.

Referenses

1. Pryshchepa M.M., Pohrebniak V.P. (2006) *Mikroelektronika* [Microelectronics]: in 3 p. P. 2. *Elementy mikroskhemotekhniky* [Elements of microskhemotekhniky]. Kyiv : High school.

2. Ghotra Z.Ju. (2010) *Tekhnologhija elektronnoji tekhniky*: navch. posib. in 2 t. T. 1. Ljviv : Ljvivsjka politekhnika.

3. Mykhalichenko P.Ie., Frolov O.V., Nadtochyi A.V. (2024) *Optymizatsiia tekhnolohii vyhotovlennia epitaksialno-planarnoho varykapa* [Operational calculation of microcircuit elements and semiconductor devices]. Mykolaiv : Ilion.

4. Frolov O.M., Maronchuk I.YE., Kurak V.V. Sposib vyghotovlennja vysokochastotnykh bipoljarnykh *n-p-n* tranzystoriv. Deklar. pat. No 33442 A Ukrajina. HOIL 7/34, opubl. *Bulletin*. No 1. Data 15.02.2001.

5. Richard S. Muller, Theodore I. Kamins, Mansun Chan. (2002) *Device electronics for integrated*. [Electronic resource] Circuits-John Wiley & Sons,. https://document/733331153/Richard-S-Muller-Theodore-I-Kamins-Mansun-Chan-Device-Electronics-for-Integrated-Circuits-John-Wiley-Sons-2002

6. Sze S.M. (2002). Semiconductor Devices, physics and technology: 2nd ed. Published by John Wiley and Sons Ltd. 574 p.

7. Nikolajchuk Gh.P. (2023). Fizychni osnovy napivprovidnykovykh pryladiv [Elektronnyj resurs] : navch. posib. Nac. tekhn. un-t “Kharkiv. politekhn. in-t”. Kharkiv. https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/64176

8. GhST 11 20.9903. Mikroskhemy integhraljni ta napivprovidnykovi prylady. Systema operacijnogho kontrolju u procesi vyrobnyctva. Tekhnichni vymoghy do tekhnologhichnogho procesu pid chas atestaciji vyrobnyctva. – 65 p.

9. Maekava S., Oshida F. Diffusion of boron in silicon. *J. Phys. Soc. of Japan*. 1967, v. 19, no 3. pp. 253–257.

10. Tsai C.C.J. Shallow phosphorus diffusion profiles in silicon. *Proc. IEEE*. 1969. v. 57, no 9. pp. 1499–1506.

УДК 546.72 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.35

Л. А. ФРОЛОВА
доктор технічних наук,
професор кафедри технології неорганічних речовин та екології
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7970-2264

Д. О. РОДІН
аспірант кафедри технології неорганічних речовин та екології
Український державний університет науки і технологій
ORCID: 0009-0004-6902-5473

СТРУКТУРНІ, МАГНІТНІ ТА ФОТОКАТАЛІТИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ФЕРИТУ $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$

В останні роки шпінельні ферити привернули значний дослідницький інтерес завдяки унікальності фізичних та хімічних властивостей, що зумовлює їх використання в багатьох сферах застосування. Зокрема ферити кобальту мають низку специфічних властивостей, таких як висока питома площа поверхні, протимікробна і фотокаталітична активність, виражені магнітні властивості. Метою даного дослідження є отримання феритy $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ *за допомогою гідротермальної обробки у реакторі високого тиску та визначення структури, морфології, магнітних і фотокаталітичних властивостей наночастинок. Морфологію та елементний склад зразків досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM-6390LV та енергодисперсійного спектрометра AZtecEnergy X-maxN50. Дослідження магнітних властивостей нанопорошків допованого феритy кобальту проводили методом вібраційної магнітометрії. Встановлено, що отримані наночастинки композитів* $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ *мають складний фазовий склад. Спостерігаються досить інтенсивні розширені піки феритy кобальту зі шпінельною структурою та невиражені піки, що відповідають металічному залізу. Середній розмір частинок, який оцінювали методом скануючої електронної мікроскопії, складає ~400–500 А, що збігається з розрахованими значеннями розміру кристалітів, отриманими з даних рентгенофазового аналізу. Розмір кристалітів, визначений за різними методиками склав* L_{311} *= 358 А,* L_{440} *= 484 А, L = 446 А. Значення намагніченості насичення, що визначено з петлі гістерезису, складає 143 А* $м^2/кг$*. Значення коерцитивної сили становить близько 380 Ерстед. За допомогою повного факторного аналізу побудовані ізолінії ступеню деструкції метиленового синього. З'ясовано, що* $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ *проявляє значні фотокаталітичні властивості в реакції деструкції МС. Максимальний ступінь деструкції становить 99 %. Основними впливовими факторами є маса фотокалізатору та тривалість обробки.*

Ключові слова: *ферити, намагніченість насичення, коерцитивна сила, кристаліти.*

L. A. FROLOVA
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Technology of Inorganic Substances and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0001-7970-2264

D. O. RODIN
Postgraduate Student at the Department of Technology
of Inorganic Substances and Ecology
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0009-0004-6902-5473

STRUCTURAL, MAGNETIC AND PHOTOCATALYTIC PROPERTIES OF FERRITE $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$

In recent years, spinel ferrites have attracted significant research interest due to the uniqueness of their physical and chemical properties, which determines their use in many application areas. In particular, cobalt ferrites have many specific properties, such as high specific surface area, antimicrobial and photocatalytic activity, and pronounced magnetic properties. This study aims to obtain $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ *ferrite by hydrothermal treatment in a high-pressure reactor and determine the nanoparticle's structure, morphology, and magnetic and photocatalytic properties. The morphology and elemental composition of the samples were studied using a JSM-6390LV scanning electron microscope and an AZtecEnergy X-maxN50 energy-dispersive spectrometer. The magnetic properties of doped cobalt ferrite nanopowders were studied using the vibrational magnetometry method. It was found that the obtained nanoparticles*

of $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ *composites have a complex phase composition. There are quite intense broadened peaks of cobalt ferrite with spinel structure and indistinct peaks corresponding to metallic iron. The average particle size, estimated by scanning electron microscopy, is ~400–500 Å, which coincides with the calculated values of crystallite size obtained from X-ray phase analysis data. The crystallite size, determined by different methods, was* L_{311} *= 358 Å,* L_{440} *= 484 Å, and L = 446 Å. The value of saturation magnetization, determined from the hysteresis loop, is 143 Emu/g. The value of coercive force is about 380 Oe. Using complete factor analysis, isolines of the degree of destruction of methylene blue were constructed. It was found that* $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ *exhibits significant photocatalytic properties in the MS destruction reaction. The maximum degree of destruction is 99 %. The main influencing factors are the photocatalyst's mass and the treatment duration.*

Key words: *ferrites, saturation magnetization, coercive force, crystallites.*

Постановка проблеми

В останні роки шпінельні ферити привернули значний дослідницький інтерес завдяки унікальності фізичних та хімічних властивостей, що зумовлює їх використання в багатьох сферах застосування. Зокрема ферити кобальту мають низку специфічних властивостей, таких як висока питома площа поверхні, протимікробна і фотокаталітична активність, виражені магнітні властивості [1–3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Незадовільне очищення стічних вод від органічних сполук призвело до значного забруднення води і ґрунтів. Поширені забруднювачі, такі як органічні барвники, використовуються у виробництві шкіри, текстилю, пластмас, фармацевтичних, лікарських та косметичних засобів. Ці забруднюючі речовини чинять негативний вплив на довкілля та здоров'я людини. Відповідно, ефективне видалення органічних барвників зі стічних вод є наразі важливою науковою задачею [4]. Метиленовий синій (МС) належить до групи тіазинових катіонних барвників і зазвичай використовується для фарбування паперу, бавовни, шовку та деревини, що створює значні ризики для здоров'я людей [5–7]. Для видалення барвників з води використовуються фізико-хімічні процеси очищення, а саме: коагуляція, опромінення, хімічне окислення, озонування, іонний обмін, електрохімічне окислення, адсорбція, реагентний та зворотній осмос. Однак барвники є достатньо стійкими до фізико-хімічної обробки. Застосування фотокаталізаторів є ефективним методом у сфері очищення від органічних сполук [8–10]. Наночастинки феритів були визнані ефективними каталізаторами в різноманітних реакціях. Наприклад, деструкція спиртів, декарбоксилювання, інгібування корозії, окислення вуглеводнів, окисне дегідрування та електрокаталіз. Крім того, наявність магнітних властивостей у каталізаторів зменшує втрати каталізатора під час процесу.

Формулювання мети дослідження

Метою даного дослідження є отримання фериту кобальту за допомогою гідротермальної обробки у реакторі високого тиску та визначення структури, морфології, магнітних і фотокаталітичних властивостей наночастинок фериту кобальту.

Викладення основного матеріалу дослідження

Синтез здійснювали при безперервному перемішуванні відповідної суміші розчинів сульфатів з необхідним співвідношенням катіонів як у фериті. Використовували 0,5 М розчини солей заліза та кобальту ч.д.а. Отриманий золь обробляли у реакторі високого тиску (ВТР). Дослідження фазового складу зразків проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.0 в Co-K_α-монохроматичному випромінюванні. Сканування проводили при кімнатній температурі в діапазоні кутів 10–90 θ, період = 0,04 θ. Морфологію та елементний склад зразків досліджували за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM-6390LV та енергодисперсійного спектрометра AZtecEnergy X-maxN50. Дослідження магнітних властивостей нанопорошків фериту кобальту проводили методом вібраційної магнітометрії.

Фотокаталітичну активність фериту вивали за допомогою методу планування експерименту. В якості впливових факторів були обрані маса фотокаталізатору, концентрація перекису водню та тривалість обробки (табл. 1).

Таблиця 1

Натуральні та кодовані значення рівнів факторів

Фактор	Натуральні значення			Кодовані		
	максимум	мінімум	центр	максимум	мінімум	центр
Маса, г/100мл	0,15	0,05	0,1	+1	-1	0
Об'єм H_2O_2, мл/100мл	0,650	0,250	0,45	+1	-1	0
Час, хвилин	30	10	20	+1	-1	0

В якості функції відгуку використовували ступінь розкладання метиленового синього (МС).

$$\%X = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100\ \%, \tag{3}$$

де C_0 – початкова концентрація МС в розчині, C_t – концентрація в момент часу t.

Ідентифікацію та визначення концентрації МС, проводили спектрофотометричним аналізом за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC. План проведення повного факторного експерименту представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

План проведення та результати експерименту

№	m_{cat}	H_2O_2	t	X_{MC}, %
1	1	1	–1	71.52
2	1	–1	–1	79.12
3	1	1	1	97.50
4	1	–1	1	98.21
5	–1	1	–1	79.10
6	–1	–1	–1	94.95
7	–1	1	1	99.07
8	–1	–1	1	94.95

3. Результати та обговорення

На рисунку 1 представлена рентгенограма зразка, синтезованого у ВТР. Спостерігаються досить інтенсивні розширені піки фериту кобальту зі шпінельною структурою та присутні також невиражені піки, що відповідають α-Fe. Дані РФА досить добре узгоджуються зі стандартними значеннями для $CoFe_2O_4$ (JCPDS:22-1086).

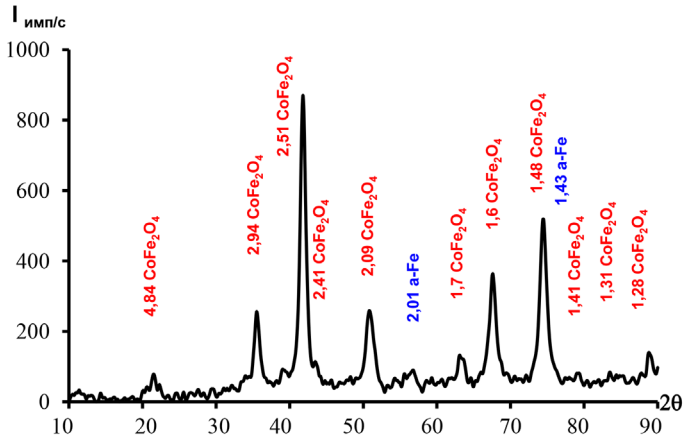


Рис. 1. Рентгенівська дифрактограма $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$

На рис. 2 показані мікрофотографії фериту отримані за допомогою скануючої електронної мікроскопії. При збільшенні в 1000 разів можна відмітити агломерацію частинок, середній розмір яких складає ~300–400 А, що співпадає з розрахованими значеннями розміру кристалітів, отриманими з даних рентгенофазового аналізу. Розмір кристалітів, визначений за різними методиками склав L_{311} = 358А, L_{440} = 484 А, L = 446 А. Параметр кристалічної решітки дорівнює 8,3631А, і відповідає параметру решітки фериту кобальту.

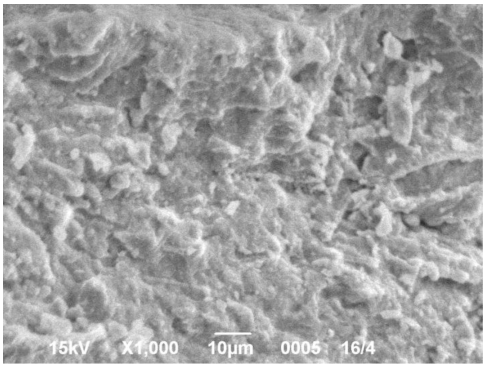


Рис. 2. СЕМ зображення наночастинок зразка $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$

Намагніченість насичення фериту складає 143 А м^2/кг, що значно вище ніж спостерігається для фериту кобальту. Це пов'язано з присутністю невеликої кількості металічного заліза, тобто наявність феромагнетика підвищує магнітні властивості матеріалу. Коерцитивна сила складає 380 Ерстед (рис. 3).

Наступним етапом досліджень було визначення фотокаталітичної активності синтезованих наночастинок фериту в реакціях деструкції метиленового синього.

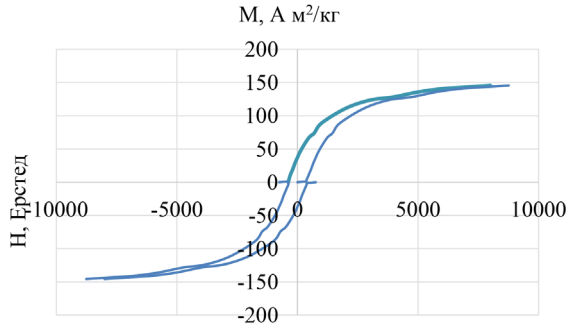


Рис. 3. Петля магнітного гістерезису зразка $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$

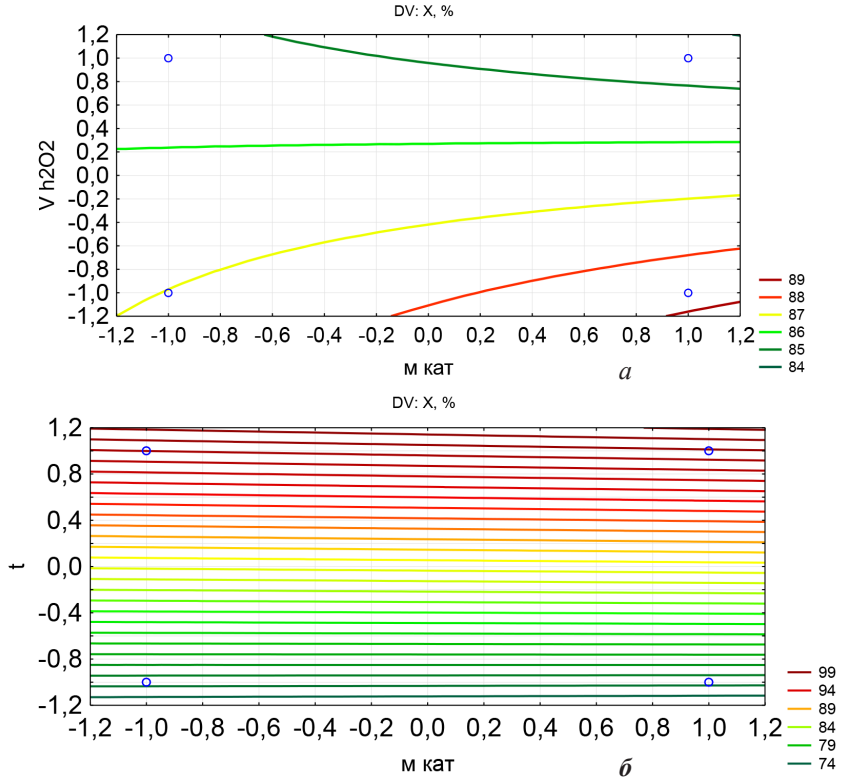


Рис. 4. Залежність ступеню деградації МС від об'єму перекису водню та маси фотокаталізатору (*а*) та від часу обробки та маси фотокаталізатору (*б*)

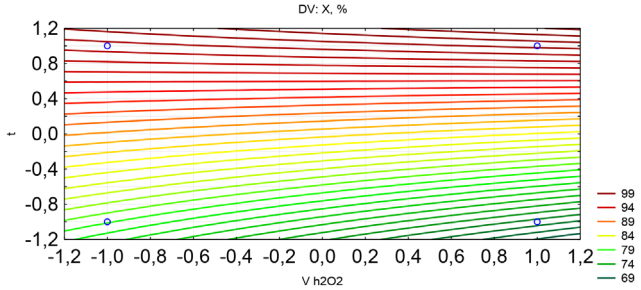


Рис. 5. Залежність ступеню деградації МС від об'єму перекису водню та часу обробки

План експерименту складався з 8 основних точок, що налічує 8 експериментів, як показано в таблиці 2. Експериментальні значення функції відгуку (ступень розкладання МС) для кожної комбінації факторів, представлено в таблиці 2.

Вплив факторів на процес деградації МС показано на рис. 4, 5. Вплив концентрації H_2O_2 у досліджуваному діапазоні можна оцінити за рис. 4, *а*. При збільшенні концентрації H_2O_2 в реакційній суміші, ступінь деструкції дещо зменшується. Однак з графіку видно, що збільшення концентрації перекису водню при значеннях маси фотокаталізатору в діапазоні 0–+1, 2 призводить до збільшення ступеню деструкції. Одночасне збільшення часу обробки та концентрації H_2O_2 також призводить до збільшення ступеню деструкції.

Висновки

Магнітні наночастинки $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ були отримані шляхом гідротермального синтезу. Середній розмір частинок, за результатами скануючої електронної мікроскопії складав 400–500 А. Визначені з петлі гістерезису значення намагніченості насичення склали 143 А м^2/кг, коерцитивна сила 380 Ерстед. З'ясовано, що $CoCe_{0.3}Fe_{1.7}O_4$ проявляє значні фотокаталітичні властивості в реакції деструкції МС. Максимальний ступінь деструкції становить 99 %. Основними впливовими факторами є маса фотокалізатору та тривалість обробки.

Список використаної літератури

1. Zhang S., Wu J., Li F., Li L. Enhanced photocatalytic performance of spinel ferrite (MFe_2O_4, M = Zn, Mn, Co, Fe, Ni) catalysts: The correlation between morphology–microstructure and photogenerated charge efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. № 10(3). 2022. P. 107702.

2. Krishnan Y., Babu K., Sakkaraiyan S., Dinesh A., Shanmugam A., Radhakrishnan K., Ayyar M. Spinel Cobalt Ferrite Nanoparticles for Photocatalysts, Sensor and Biomedical Applications: A Review. *Semiconductors*. № 58(9). 2024. P. 721–739.

3. Abraham A.G., Manikandan A., Manikandan E., Vadivel S., Jaganathan S.K., Baykal A., Renganathan P.S. Enhanced magneto-optical and photo-catalytic properties of transition metal cobalt (Co^{2+} ions) doped spinel $MgFe_2O_4$ ferrite nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. № 452. 2018. P. 380–388.

4. Karpińska J., Kotowska U. Removal of organic pollution in the water environment. *Water*. № 11(10). 2019. P. 2017.

5. He Z., Li G., Chen J., Huang Y., An T., Zhang C. Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops. *Environment international*. № 77. 2015. P. 85–94.

6. Madhav S., Ahamad A., Singh A. K., Kushawaha J., Chauhan J.S., Sharma S., Singh P. Water pollutants: sources and impact on the environment and human health. *Sensors in water pollutants monitoring: Role of material*. 2020. P. 43–62.

7. Cheng Y., Zhang S., Wang Z., Wang B., You J., Guo R., Zhang H. Review on spinel ferrites-based materials (MFe_2O_4) as photo-Fenton catalysts for degradation of organic pollutants. *Separation and Purification Technology*. № 318. 2023. P. 123971.

8. Dutta V., Sharma S., Raizada P., Hosseini-Bandegharaei A., Gupta V. K., Singh P. Review on augmentation in photocatalytic activity of $CoFe_2O_4$ via heterojunction formation for photocatalysis of organic pollutants in water. *Journal of Saudi Chemical Society*. № 23(8). 2019. P. 1119–1136.

9. Dojcinovic M.P., Vasiljevic Z.Z., Pavlovic V.P., Barisic D., Pajic D., Tadic, N.B., Nikolic M.V. Mixed Mg–Co spinel ferrites: Structure, morphology, magnetic and photocatalytic properties. *Journal of alloys and compounds*. № 855. 2021. P. 157429.

10. Wu Q., Song Y. Recent advances in spinel ferrite-based magnetic photocatalysts for efficient degradation of organic pollutants. *Water Science & Technology*. № 87(6). 2023. P. 1465–1495.

References

1. Zhang S., Wu J., Li F., Li L. (2022) Enhanced photocatalytic performance of spinel ferrite (MFe_2O_4, M = Zn, Mn, Co, Fe, Ni) catalysts: The correlation between morphology–microstructure and photogenerated charge efficiency. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, no. 10(3), pp. 107702.

2. Krishnan Y., Babu K., Sakkaraiyan S., Dinesh A., Shanmugam A., Radhakrishnan K., Ayyar M. (2024). Spinel Cobalt Ferrite Nanoparticles for Photocatalysts, Sensor and Biomedical Applications: A Review. *Semiconductors*, no. 58(9), pp. 721–739.

3. Abraham A.G., Manikandan A., Manikandan E., Vadivel S., Jaganathan S.K., Baykal A., Renganathan P.S. (2018) Enhanced magneto-optical and photo-catalytic properties of transition metal cobalt (Co^{2+} ions) doped spinel $MgFe_2O_4$ ferrite nanocomposites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 452, pp. 380–388.

4. Karpińska J., Kotowska U. (2019) Removal of organic pollution in the water environment. *Water*, no. 11(10), pp. 2017.

5. He Z., Li G., Chen J., Huang Y., An T., Zhang C. (2015) Pollution characteristics and health risk assessment of volatile organic compounds emitted from different plastic solid waste recycling workshops. *Environment international*, no. 77, pp. 85–94.

6. Madhav S., Ahamad A., Singh A.K., Kushawaha J., Chauhan J.S., Sharma S., Singh P. (2020). Water pollutants: sources and impact on the environment and human health. *Sensors in water pollutants monitoring: Role of material*, pp. 43–62.

7. Cheng Y., Zhang S., Wang Z., Wang B., You J., Guo R., Zhang H. (2023) Review on spinel ferrites-based materials (MFe_2O_4) as photo-Fenton catalysts for degradation of organic pollutants. *Separation and Purification Technology*, no. 318, pp. 123971.

8. Dutta V., Sharma S., Raizada P., Hosseini-Bandegharaei A., Gupta V.K., Singh P. (2019) Review on augmentation in photocatalytic activity of $CoFe_2O_4$ via heterojunction formation for photocatalysis of organic pollutants in water. *Journal of Saudi Chemical Society*, no. 23(8), pp. 1119–1136.

9. Dojcinovic M.P., Vasiljevic Z.Z., Pavlovic V.P., Barisic D., Pajic D., Tadic, N.B., Nikolic M.V. (2021) Mixed Mg–Co spinel ferrites: Structure, morphology, magnetic and photocatalytic properties. *Journal of alloys and compounds*, no. 855, pp. 157429.

10. Wu Q., Song Y. (2023) Recent advances in spinel ferrite-based magnetic photocatalysts for efficient degradation of organic pollutants. *Water Science & Technology*, no. 87(6), pp. 1465–1495.

УДК 661.18+615.47+677.61/.62 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.36

Л. А. ХРОКАЛО
кандидат біологічних наук, доцент,
доцент кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-4334-6629

В. І. ВОРОБЙОВА
доктор технічних наук, доцент,
завідувач кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-7479-9140

О. О. СУМОВСЬКА
студентка кафедри фізичної хімії
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0006-4261-4790

Є. О. АНГОЛЕНКО
хімік-технолог
ТОВ «Робьюті косметікс»
ORCID: 0009-0007-3995-1056

СИНТЕЗ НАНОСИСТЕМИ НА ОСНОВІ ТЕТРАХЛОРАУРИНОВОЇ КИСЛОТИ ТА СЛИЗУ РАВЛИКА *CORNU ASPERSUM*, ВКЛЮЧЕННЯ ЇЇ ДО СКЛАДУ КОСМЕТИЧНИХ ПАТЧІВ ТА КЛІНІЧНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Синтезовано наносистеми золота шляхом відновлення тетрахлораурату глікопротеїнами слизу равлика Cornu aspersum. Визначено оптимальні умови синтезу, включаючи співвідношення реагентів, температуру, pH середовища, час та умови змішування і відстоювання. Найкращі результати отримано за використання свіжоприготованого 0,1 % водного розчину ліофілізованого слизу равлика, змішаного з 0,5 мМ/л розчином $HAuCl_4$ *у співвідношенні 1:2 при pH 12 та витримування під природним освітленням протягом 24 годин. Спектрометричний аналіз підтвердив утворення наночастинок шляхом реєстрації смуги поверхневого плазмонного резонансу при 550 нм. Досліджено антибактеріальну активність синтезованих наносистем методом дисково-дифузійного аналізу, що виявило бактеріостатичний ефект щодо грампозитивної бактерії Bacillus subtilis. Три отримані наносистеми інтегровано у розроблений косметичний засіб для догляду за шкірою навколо очей – рідкі патчі. Оригінальна рецептура засобу передбачає тонізуючу, живильну та зволожуючу дію завдяки активним компонентам: кофеїн (0,5 %), гіалуронова кислота (0,5 %), фільтрат галактоміцетів (3 %) та полісахарид фукогель (1 %). Клінічні випробування рідких патчів проводили протягом 21 дня за участю 12 жінок-добровольців. Оцінку стану шкіри здійснювали за допомогою візуальних спостережень та портативного аналізатора шкіри CF-685 з камерою, що фіксував зміни рівня зволоженості, еластичності, пігментації та жирності. Встановлено, що використання патчів з наносистемами золота сприяє підвищенню зволоженості шкіри на 15–20 % та покращенню її еластичності на 10–12 %, що підтверджує їх ефективність як доглядового косметичного засобу.*

Ключові слова: *наночастинки золота, тетрахлораурат, слиз равлика, поверхневий плазмонний резонанс, антибактеріальні властивості, косметичні патчі, клінічні дослідження.*

L. A. KHROKALO
Candidate of Biological Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Physical Chemistry Department
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0000-0003-4334-6629

V. I. VOROBYOVA
Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of Physical Chemistry Department
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-7479-9140

O. O. SUMOVSKA
Student at the Physical Chemistry Department
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0009-0006-4261-4790

YE. O. ANHOLENKO
Chemical Technologist
LLC "RoBeauty"
ORCID: 0009-0007-3995-1056

NANOSYSTEM SYNTHESIS BASED ON TETRACHLOROAURIC ACID AND *CORNU ASPERSUM* SNAIL MUCUS, IT'S INCORPORATION INTO COSMETIC PATCHES AND CLINICAL EVALUATION OF EFFICACY

Gold nanosystems have been synthesized via reduction of tetrachloraurate by glycoproteins of the snail Cornu aspersum mucus. The optimal synthesis conditions, including reagents ratio, temperature, pH, time, mixing and settling conditions, were determined. The best results were obtained by using a freshly prepared 0.1 % aqueous solution of lyophilized snail mucus mixed with 0.5 mM/L $HAuCl_4$ *solution in a 1:2 ratio at pH 12 and incubated under natural light for 24 hours. Spectrometric analysis confirmed the nanoparticles creation by recording a band of surface plasmon resonance at 550 nm. The antibacterial activity of the synthesized nanosystems was studied by disk diffusion assay, which revealed a bacteriostatic effect against the Gram-positive bacterium Bacillus subtilis. The three obtained nanosystems were integrated into the developed cosmetic product for skin care around the eyes – liquid patches. The original formulation of the product provides for a tonic, nourishing and moisturizing effect due to the active ingredients, such as caffeine (0.5 %), hyaluronic acid (0.5 %), galactomycetes filtrate (3 %) and fucogel polysaccharide (1 %). Clinical trials of the liquid patches were conducted for 21 days with 12 female volunteers. The skin condition was assessed using visual analysis and a portable skin analyzer CF-685 equipped by the camera that recorded changes in moisture, elasticity, pigmentation, and oiliness. It was found that the use of patches with gold nanosystems helps to increase skin moisture by 15–20 % and improve its elasticity by 10–12 %, which confirms their effectiveness as a care cosmetic product.*

Key words: *gold nanoparticles, tetrachloraurate, snail mucus, surface plasmon resonance, antibacterial properties, cosmetic patches, clinical studies.*

Постановка проблеми

У сучасній науці та промисловості наночастинки золота (AuНч) набувають широкого застосування завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям, каталітичній та антибактеріальній активності, біосумісності та можливостям функціоналізації [1]. Одним із перспективних напрямів зеленого синтезу наносистем є використання біополімерів для їх утворення та подальшої стабілізації. У цьому контексті увагу привертає слиз садового равлика *Cornu aspersum*, який містить комплекс біологічно активних сполук, включаючи білки, глікопротеїди, алантоїн та гліколеву кислоту. Синтез AuНч із залученням слизу молюсків є перспективним підходом для створення екологічно безпечних та біосумісних матеріалів, які можуть застосовуватися у фармацевтиці та косметології. Окрім цього, незважаючи на велику кількість досліджень, присвячених AuНч, їхній взаємодії з біополімерами, глікопротеїдам слизу равлика приділено недостатньо уваги, зокрема умовам синтезу, антибактеріальній активності, ефективності в складі косметичних продуктів та безпеці використання. Таким чином, дослідження синтезу та властивостей наносистем золота на основі слизу равлика є актуальною науковою задачею, вирішення якої сприятиме створенню нових функціональних матеріалів для косметичних застосувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перспективним підходом до зеленого синтезу AuНч є використання природних рослинних екстрактів [2; 3] та біополімерів, що виконують роль відновників і стабілізаторів. Слиз равлика в чистому вигляді завдяки наявності глікопротеїдів має значні регенеруючі властивості, зокрема демонструє полегшення перебігу експериментально викликаного коліту, що можна пояснити його протизапальною, антиоксидантною та імуномодулюючою властивостями [4]. З іншого боку слиз равлика завдяки високому вмісту білків і глікопротеїдів сприяє формуванню наночастинок із меншою токсичністю та вищою біодоступністю порівняно з хімічними методами [5; 6].

Також встановлено, що pH середовища суттєво впливає на морфологію та стабільність отриманих наносистем [7]. Відомо, що AuНч, одержані на основі слизу равлика мають здатність відновлювати клітини після оксидативного стресу, що розглядають як профілактику раку шкіри [8; 9]. Спостерігається суттєва згасання запалення, за рахунок зниження синтезу простагландинів, вибіркове пригнічення росту клітин меланоми, без впливу на здорові клітини та поглинання ультрафіолету. AuНч стабільні у воді, безпечні для кератиноцитів та прискорюють їхню проліферацію, сприяючи регенерації шкіри [10]. Досліджено доцільність використання екстракту слизу равлика для загоєння ран і протизапальної терапії та підтверджено його протизапальний, антибактеріальний та імуностимулюючий потенціал [11–13].

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є розробка та аналіз AuНч на основі тетрахлорауринової кислоти та слизу равлика *Cornu aspersum* з метою оптимізації умов їх синтезу, оцінки антибактеріальної активності та визначення ефективності у складі косметичних патчів для шкіри навколо очей.

Викладення основного матеріалу дослідження

Для виготовлення наносистеми використовували 0,5 мМ/л розчин тетрахлораурату та свіжоприготований 0,1 % водний розчин ліофілізованого слизу равлика *Cornu aspersum*, підігрітий до 37–40 °С. Синтез проводили за кількох варіантів співвідношень реагентів, температури 45 °С з постійним перемішуванням. Було випробувано три зразки слизу: фільтрований на бактеріальному фільтрі без консерванту, фільтрований із консервантом Sharomix 300, нефільтрований із консервантом. Проведений нами в попередніх дослідженнях гравіметричний аналіз ліофілізату слизу підтвердив високий вміст в ньому термолабільних білків [5]. Оскільки відомо, що оптимальний синтез відбувається в лужному середовищі, ми додавали по краплинах 0,1 М розчин KOH до знебарвлення розчину $HAuCl_4$, регулюючи pH. Після цього систему розводили у 20 разів, підігрівали до 50 °С та перемішували 40–60 хв до появи рожевого, фіолетового або синього забарвлення. Було отримано п’ять стабільних дисперсних систем з різними умовами pH. Перший зразок (співвідношення реагентів 1:1; без додавання лугу) після двох діб відстоювання мав pH 7. Другий (1:2; pH 12) після двох діб встановився на рівні pH 9. Третій (1:1; pH 12) стабілізувався до pH 9, четвертий (1:1; pH 11) – до pH 10, п’ятий (1:1; pH 10) – до pH 9. Розчини витримували дві доби за 15 °С за природного освітлення для стимулювання «дозрівання». Наявність AuНч підтверджували візуально за зміною кольору системи та спектрофотометрично за рахунок фіксації смуги поверхневого плазмонного резонансу (ППР). Колір наносистеми золота, що утворюється, залежить від розміру частинок: синій (розмір понад 50 нм), фіолетовий або рожевий (10–20 нм), а також відсутності агрегації (рис. 1).



Рис. 1. Візуальний аналіз синтезованих зразків AuНч

Спектрометричний аналіз одержаних зразків проводили на спектрофотометрі Specord M40 у діапазоні 300–600 нм. Реєстрація смуги ППР в AuНч, приготованих із додаванням лугу представлена на рис. 2.

Максимум на кривій відповідає смузі ППР за довжини хвилі 540–550 нм, що відповідає золоту в наноформі.

На кривих адсорбції зареєстровані максимуми, що фіксують смугу ППР у зразків № 3, № 5, № 8, що свідчить про утворення якісноих стабільних наносистем золота.

AuНч, що були синтезовані на різних видах слизу (фільтрованого і не фільтрованого без/з додаванням консерванту) без крапельного коригування pH представлені на рис. 3.

Після аналізу спектрів та було відібрано три кращі зразки стабільних AuНч, якими виявились: «без лугу», «pH 11» та «pH 12, співвідношення реагентів 1:2» для оцінки антибактеріальної дії. Антибактеріальну дію оцінювали дисково-дифузійним методом за використання тест-культур грамнегативної бактерії *Escherichia coli*

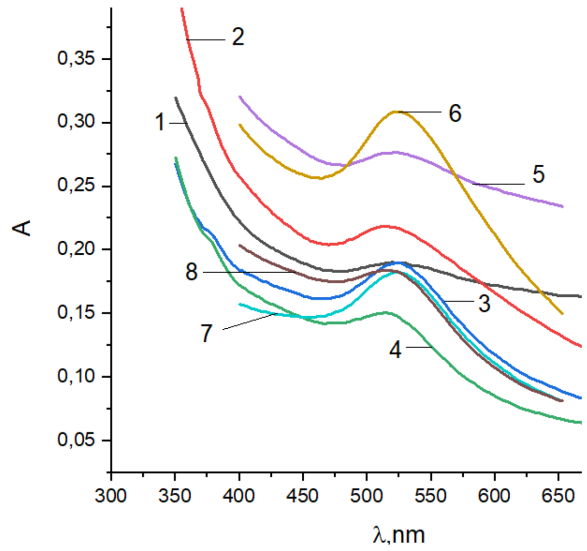


Рис. 2. Смуги ППР синтезованих AuНч з додаванням лугу: 1 – слиз нефільтрований, робочі розчини 1:1, pH = 10; 2 – нефільтрований, 1:1, pH = 11; 3 – нефільтрований, 1:1; pH = 12; 4 – нефільтрований, 1:2, pH = 12; 5 – фільтрований, 1:1, pH = 10; 6 – фільтрований, 1:1, pH = 11, відстоювання 6 діб; 7 – не фільтрований, 1:2; pH = 12, відстоювання 6 діб; 8 – не фільтрований, 1:1, pH = 12, відстоювання 6 діб

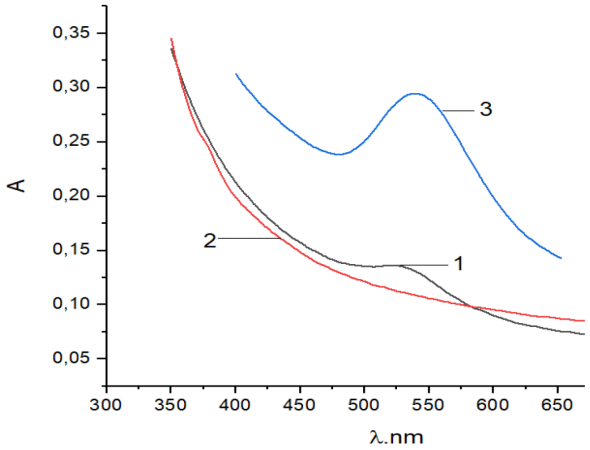


Рис. 3. Смуги ППР синтезованих AuНч без додавання лугу, співвідношення базових реагентів 1:1. 1 – слиз фільтрований з консервантом, 2 – фільтрований без консерванту, 3 – нефільтрований з додаванням консерванту

УКМ В-906 та грампозитивної спороутворюючої *Bacillus subtilis* УКМ В-5006Т. Поверхню чашки Петрі, заповнену стерильним поживним агаром, засіяли одноденним інокулятом тест-культур. Після цього на поверхню розклали диски фільтрувального паперу діаметром 5 мм, змочені у AuНч. Візуальний огляд проводили після першої доби культивування за 36 °С і 5 діб культивування, фіксуючи розмір зон інгібування росту бактерій по периметру дисків. Виявлення прозорої зони навколо дисків свідчило про бактерицидну дію, виявлення мутної непрозорої, однак відділеної зони навколо диска означало бактеріостатичну дію (ріст бактерій пригнічувався, а потім відновлювався). Результати антибактеріального тесту представлені на рисунку 4.

Як видно на фото звіті, випробування показали відсутність чіткої бактерицидної активності проти обох культур, хоча зразок із pH 11 мав невеликі (≈1 мм) зони інгібування *B. subtilis*, а зразки з pH 12 та без лугу – розмиті бактеріостатичні зони.

Таким чином, в результаті спектроскопічного і антибактеріального аналізів для введення в для косметичний продукт було обрано три зразки: «без лугу», «pH 11» та «pH 12, 1:2».

Авторами статті було розроблено оригінальну рецептуру косметичного продукту – рідких патчів під очі, яка наведена в таблиці 1.

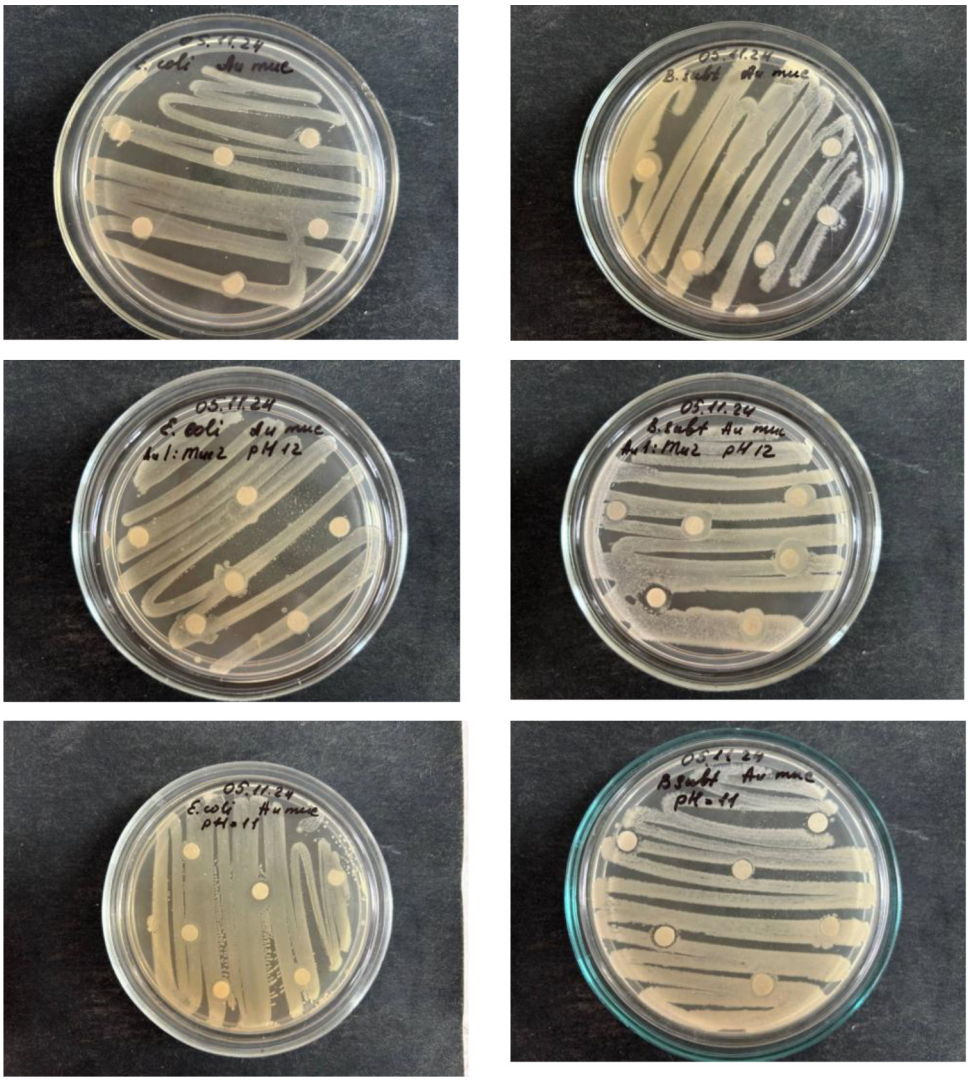


Рис. 4. Тест на антибактеріальну дію АuНч після доби культивування в термостаті на культурах *E. coli* та *B. subtilis*

Таблиця 1

Рецептура косметичних патчів по догляду за шкірою навколо очей

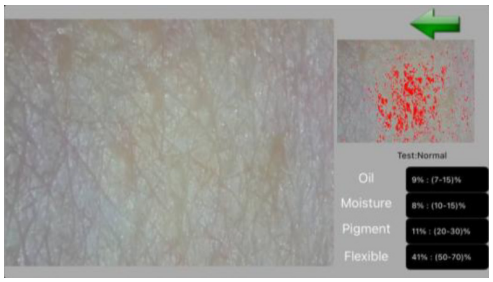
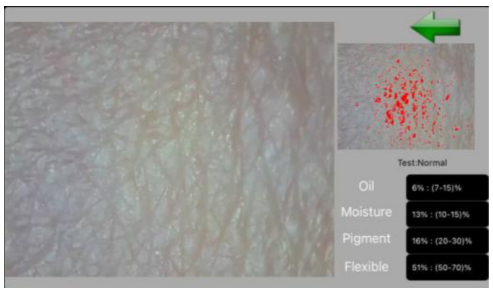
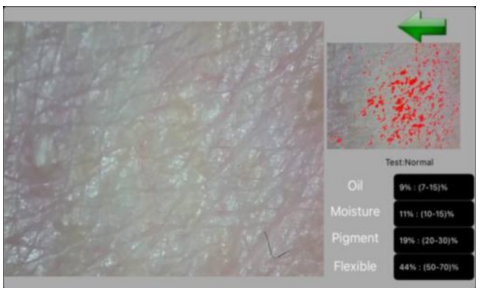
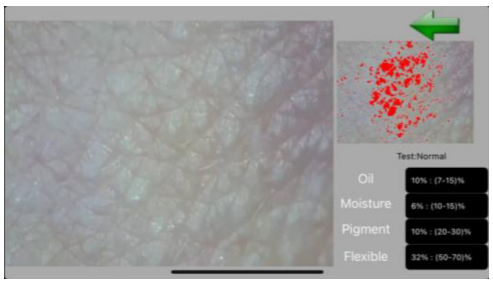
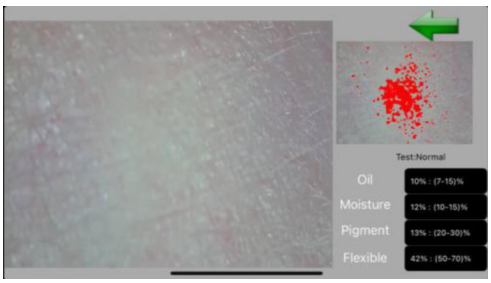
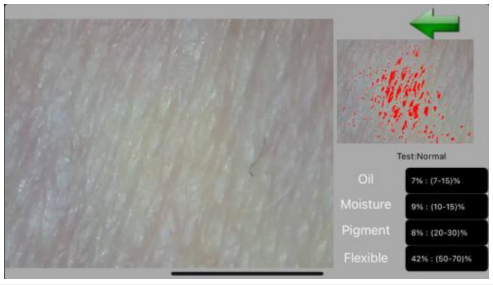
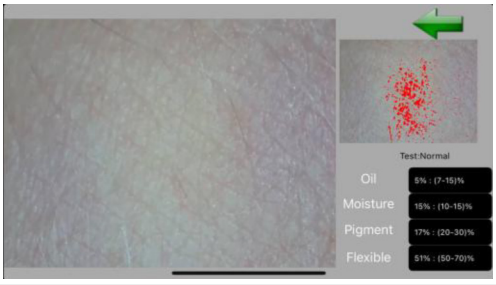
Компонент	**Вміст, %**	**INCI**	**Функціональна дія**
Вода	68,1	Aqua	Розчинник
Aristoflex Velvet	1,6	Polyacrylate Crosspolymer-11	Гелеутворювач
Вода	10	Aqua	Розчинник
Кофеїн	0,5	Caffeine	Антиоксидант, Тонізуюча дія
Гіалуронова кислота	0,5	Sodium Hyaluronate	Зволожувач
Пропандіол	3	Propanediol	Зволожувач, розчинник активів
Ziga Bio GFF	3	Galactomyces Ferment Filtrate	Антиоксидант, Еластичність
NLT AdenoSphere 2.0™	2	Aqua, Butylene Glycol, Lecithin, Adenosine	Протизапальна, Антивікова дії
Fucogel	1	Biosaccharide gum-1	Заспокоюча дія, Зволожувач
Aquaxyl	3	Xylitylglucoside, Anhydroxylitol, Xylitol	Зволожувач
АuНч	1,00	Colloidal Gold	Антибактеріальна дія, Еластичність
Вода	5	Aqua	Розчинник
ПЕГ 40	0,5	PEG-40 Hydrogenated Castor Oil	Солюбілізатор
Sharomix EG 10	0,8	Phenoxyethanol,Ethylhexylglycerin	Консервант

Виробничі процеси приготування прототипу патчів включали наступні етапи. В основну ємність додали 2/3 води, нагріли до 60…70 °С і розчинили Aristoflex Velvet для формування гелевої основи. В окремій ємності у воді розчинили кофеїн (гаряча вода 70 °С) та гіалуронову кислоту (холодна вода 4 °С), після чого розчини додали до основної маси. Гель перемішували до однорідності, охолодили до 35 °С, потім почергово вводили активні компоненти, в тому числі AuНч. Консервант Sharomix EG 10 перед додаванням до продукту розчинили у PEG-40.

Для оцінки ефективності і безпечності косметичного засобу були проведені клінічні дослідження, у яких взяли участь 12 жінок-добровольців (3 групи по 4 особи). Дослідження проводили відповідно до етичного протоколу: добровольці надали згоду щодо участі у випробуваннях та використання даних. Повний термін випробувань тривав 21 добу, при чому спочатку засіб тестували без введення наночастинок і останні 7 діб з додаванням AuНч. Було протестовано три вищезгадані наносистеми, що були визнані стабільними з бактеріостатичною дією. Косметичний ефект визначали за зміною параметрів шкіри, які оцінювали портативним аналізатором CF-685: пігментація, жирність, зволоженість та еластичність. Сертифікована програма Easy in Smile, яку використали для обробки результатів, пропонує референтні значення параметрів шкіри: жирність (7–15 %), зволоженість (10–15 %), пігментація (20–30 %), еластичність (50–70 %).

Таблиця 2

Результати випробовувань у вигляді фото з камери аналізатора, де відображені фактичні і референті значення по одному учаснику з кожної референтної групи

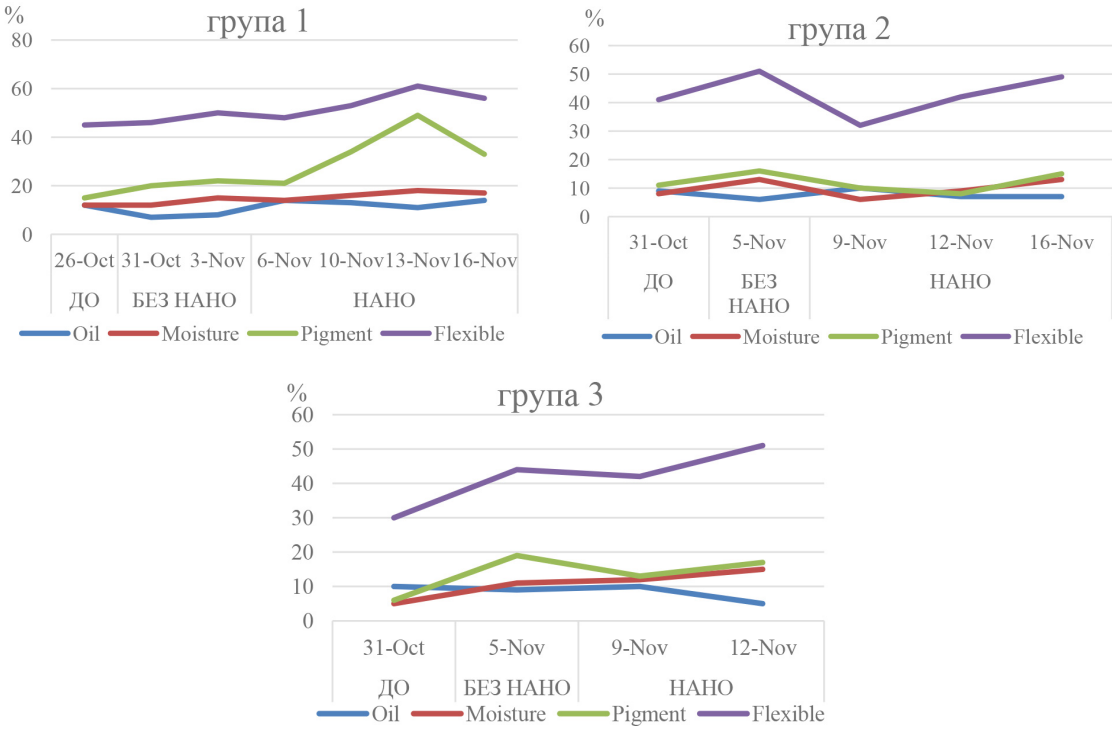
Дата, примітки	Учасник, що випробовувала Au Нч. pH=11	Учасник, що випробовувала Au Нч без лугу
31.10.24 – до тестування патчів		
05.11. 24 початок тестування патчів		
09.11.24 після введення наночастинок		
16.11.24		

Проведено аналіз показників шкіри до та після застосування патчів без/з AuНч. Група 1 випробовувала AuНч 1:2, pH 12; Група 2 – AuНч 1:1, pH 11; Група 3 – AuНч 1:1, без лугу. Стан шкіри фіксували камерою аналізатора шкіри CF-685, для ілюстрації демонструємо результати кількох учасників (табл. 2). З дванадцяти осіб, що взяли участь у випробуваннях, лише одна учасниця після застосування засобу з AuНч 1:1, pH 11 відзначила посилення інтенсивності забарвлення капілярної сітки шкіри навколо очей, що свідчить про індивідуальну реакцію – подразнюючий ефект для чутливої шкіри.

Узагальнена картина параметрів, які змінювались в часі до застосування патчів (перший вимір), потім користування патчами без додавання наносистем золота і ще 7 діб користування патчами з додаванням наносистем в кількості 1 % представлені в таблиці 3.

Таблиця 3

Динаміка змін показників стану шкіри до та під час користування патчами під очі



Зведені результати клінічних випробувань підтвердили високу толерантність до продукту та відсутність серйозних побічних реакцій. Найкращі результати з підвищення еластичності шкіри на 25 % (на 10 % після застосування патчів і ще на 15 % після додавання наносистеми) і зволоженості на 10 % спостерігали у учасників клінічного дослідження, які випробовували засіб з AuНч без коригування pH. Освітлюючого ефекту від застосування засобу не було зафіксовано. Учасниця, яка реєструвала подразнення, імовірно мала індивідуальну реакцію на кофеїн або консервант.

Висновки

Стабільні AuНч були одержані на базі нефільтрованого слизу, що обумовлено присутністю глікопротеїдів, які не були видалені тонкопористим бактеріальним фільтром під час приготування ліофілізату слизу равлика. Глікопротеїди виступили відновниками іонів золота і стабілізаторами системи. Спектрометричний аналіз підтвердив утворення трьох стабільних

AuНч з фіксацією смуги ППР за 550 нм. Наносистеми мали бактеріостатичну дію щодо грампозитивної *B. subtilis*. Розроблено рецептуру і виготовлені прототипи косметичних патчів, клінічні дослідження яких показали підвищення зволоженості та еластичності шкіри, що можна пояснити стимуляцією фібробластів до синтезу колагену та утримання вологи в дермі. Найкращий результат спостерігався у референтній групі, яка використовувала патчі з 1 % AuНч без коригування лугом.

Список використаної літератури

1. Siddiqi K. S., Husen A. Recent advances in plant-mediated engineered gold nanoparticles and their application in biological system. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 2017. № 40. P. 10–23. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.012

2. Fanoro O. T., Oluwafemi O. S. Bactericidal antibacterial mechanism of plant synthesized silver, gold and bimetallic nanoparticles. *Pharmaceutics*. 2020. Vol. 12, №. 11. 1044. DOI: https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12111044

3. Chaurasia A. K., Singh R. K., Kumar A. Synthesis, optimization, characterization, anti-oxidant and anti-cancerous activity analysis of nanoparticles IA-AuNPs synthesized using leaf extract of soil grown *Ipomoea aquatica*. *Journal of Molecular Structure*. 2025. № 1327. 141212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.141212

4. Hatuikulipi T., Kouachi M., Bouchetob L. E., Naimi D., Bp E., Naimi D. Preventive effect of *Helix aspersa* slime against experimentally chemo-induced colitis in rat. *Der Pharm Lett*. 2016. № 8. P. 200–206.

5. Khrokalo L., Andriishyn V., Anholenko Ye. Thermogravimetric analysis of *Cornu aspersum* mucus: evaluating physicochemical properties for future therapeutic and cosmetic applications. *Biogeosphere and Socium. International Scientific Conference: the program, abstracts* (September 25–27, 2024; Słupsk, Poland). 2024. P. 63.

6. Wang L., Li S., Yin J., Yang J., Li Q., Zheng W.,... Jiang X. The density of surface coating can contribute to different antibacterial activities of gold nanoparticles. *Nano Letters*. 2020. Vol. 20, № 7. P. 5036–5042. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01196

7. Dozol H., Mériguet G., Ancian B., Cabuil V., Xu H., Wang D., Abou-Hassan A. On the synthesis of Au nanoparticles using EDTA as a reducing agent. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2013. Vol. 117, № 40. P. 20958–20966. DOI: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp4067789

8. Consoli, V., Petralia S., Vanella, L., Gulisano, M.... Sorrenti, V. Innovative snail-mucus-extract (SME)-coated nanoparticles exhibit anti-inflammatory and anti-proliferative effects for potential skin cancer prevention and treatment. *RSC Advances*. 2024. Vol. 14, № 11. P. 7655–7663. DOI: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d4ra00291a

9. Gubitosa J., Rizzi V., Fini P., Laurenzana A., Fibbi G., Veiga-Villauriz C.,... Cosma P. Biomolecules from snail mucus (*Helix aspersa*) conjugated gold nanoparticles, exhibiting potential wound healing and anti-inflammatory activity. *Soft Matter*. 2020. Vol. 16, № 48. P. 10876–10888. DOI: https://doi.org/10.1039/D0SM01638A

10. Majerič P., Jović Z., Švarc T., Jelen Ž., Horvat A., Koruga D., Rudolf R. Physicochemical properties of gold nanoparticles for skin care creams. *Materials*. 2023. Vol. 16, № 8. P. 3011. DOI: https://doi.org/10.3390/ma16083011

11. Trapella C., Rizzo R., Gallo S., Alogna A., Bortolotti D., Casciano F.,... Voltan R. *HelixComplex* snail mucus exhibits pro-survival, proliferative and pro-migration effects on mammalian fibroblasts. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, № 1. P. 17665. DOI: https://www.nature.com/articles/s41598-018-35816-3

12. Cilia G., Fratini F. Antimicrobial properties of terrestrial snail and slug mucus. *Journal of Complementary and Integrative Medicine*. 2018. Vol. 15, № 3. P. 20170168. DOI: https://doi.org/10.1515/jcim-2017-0168.

13. Khrokalo L., Chyhyrynets O., Salitra N. Chemical properties of *Helix aspersa* mucus as a component of cosmetics and pharmaceutical products. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 62. P. 7650–7653. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.217.

References

1. Siddiqi, K. S., & Husen, A. (2017). Recent advances in plant-mediated engineered gold nanoparticles and their application in biological system. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 40, pp. 10–23. https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2016.11.012

2. Fanoro, O. T., & Oluwafemi, O. S. (2020). Bactericidal antibacterial mechanism of plant synthesized silver, gold and bimetallic nanoparticles. *Pharmaceutics*, 12 (11), 1044 https://doi.org/10.3390/pharmaceutics12111044

3. Chaurasia, A. K., Singh, R. K., & Kumar, A. (2025). Synthesis, optimization, characterization, anti-oxidant and anti-cancerous activity analysis of nanoparticles IA-AuNPs synthesized using leaf extract of soil grown Ipomoea aquatica. *Journal of Molecular Structure*, 1327, 141212. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2024.141212

4. Hatuikulipi, T., Kouachi, M., Bouchetob, L. E., Naimi, D., Bp, E., & Naimi, D. (2016). Preventive effect of *Helix aspersa* slime against experimentally chemo-induced colitis in rat. *Der Pharm Lett*, 8, 200–206.

5. Khrokalo L., Andriishyn V., Anholenko Ye. (2024) Thermogravimetric analysis of *Cornu aspersum* mucus: evaluating physicochemical properties for future therapeutic and cosmetic applications. Biogeosphere and Socium. *International Scientific Conference: the program, abstracts (September 25–27, 2024; Słupsk, Poland)*. C. 63.

6. Wang, L., Li, S., Yin, J., Yang, J., Li, Q., Zheng, W.,... & Jiang, X. (2020). The density of surface coating can contribute to different antibacterial activities of gold nanoparticles. *Nano Letters*, 20(7), pp. 5036–5042. https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.0c01196

7. Dozol, H., Mériguet, G., Ancian, B., Cabuil, V., Xu, H., Wang, D., & Abou-Hassan, A. (2013). On the synthesis of Au nanoparticles using EDTA as a reducing agent. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(40), pp. 20958–20966. https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jp4067789

8. Consoli, V., Petralia S., Vanella, L., Gulisano, M.... Sorrenti, V. (2024). Innovative snail-mucus-extract (SME)-coated nanoparticles exhibit anti-inflammatory and anti-proliferative effects for potential skin cancer prevention and treatment. RSC advances, 14(11), pp. 7655–7663. https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2024/ra/d4ra00291a

9. Gubitosa, J., Rizzi, V., Fini, P., Laurenzana, A., Fibbi, G., Veiga-Villauriz, C.,... & Cosma, P. (2020). Biomolecules from snail mucus (Helix aspersa) conjugated gold nanoparticles, exhibiting potential wound healing and anti-inflammatory activity. *Soft Matter*, 16 (48), pp. 10876–10888. https://doi.org/10.1039/D0SM01638A

10. Majerič, P., Jović, Z., Švarc, T., Jelen, Ž., Horvat, A., Koruga, D., & Rudolf, R. (2023). Physicochemical properties of gold nanoparticles for skin care creams. *Materials*, 16(8), 3011 https://doi.org/10.3390/ma16083011

11. Trapella, C., Rizzo, R., Gallo, S., Alogna, A., Bortolotti, D., Casciano, F., ... & Voltan, R. (2018). HelixComplex snail mucus exhibits pro-survival, proliferative and pro-migration effects on mammalian fibroblasts. Scientific reports, 8(1), 17665. https://www.nature.com/articles/s41598-018-35816-3

12. Cilia, G., & Fratini, F. (2018). Antimicrobial properties of terrestrial snail and slug mucus. *Journal of Complementary and integrative Medicine*, 15(3), 20170168. https://doi.org/10.1515/jcim-2017-0168

13. Khrokalo L., Chyhyrynets O., Salitra N. (2022). Chemical properties of Helix aspersa mucus as a component of cosmetics and pharmaceutical products. Materials Today: Proceedings, 62, 7650–7653. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.217

УДК 620.97: 697.329 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.37

С. П. ШАПОВАЛ
доктор технічних наук,
професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-4985-0930

С. Й. МИСАК
кандидат технічних наук,
науковий співробітник кафедри автоматизації
та комп'ютерно-інтегрованих технологій
Національний університет «Львівська політехніка»
ORCID: 0000-0003-2064-7015

ДОСЛІЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОГО-ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА

У статті досліджується ефективність використання гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) у системі теплопостачання. Головною метою роботи є аналіз основних параметрів, що визначають теплову ефективність гібридного геліоколектора, а також аналіз його конструкції для підвищення теплопродуктивності.

Розглянуто основні проблеми та виклики, пов'язані з використанням традиційних джерел енергії, а також необхідність переходу на відновлювані джерела відповідно до європейських екологічних ініціатив. Визначено, що сучасні фотоелектричні панелі перетворюють лише 15–20 % поглиненої сонячної енергії в електричну, а решта втрачається у вигляді тепла. Це вимагає розробки інноваційних рішень для підвищення загальної ефективності систем енергопостачання, зокрема вдосконалення гібридних геліоколекторів.

У рамках дослідження було проведено серію експериментів для аналізу впливу ключових факторів – інтенсивності сонячного випромінювання, кута нахилу геліоколектора та масової витрати теплоносія – на теплову та електричну ефективність ГТФГК. Отримані результати підтверджують, що зі збільшенням інтенсивності випромінювання теплова ефективність геліоколектора знижується. Виявлено, що застосування концентраторів сонячного випромінювання та наявність хорошої теплоізоляції сприяє зниженню теплових втрат і підвищенню коефіцієнта корисної дії системи.

На основі дослідження запропоновано конструктивні рішення для гібридних колекторів, що дозволяють підвищити ефективність перетворення сонячної енергії та забезпечити стабільніше енергопостачання. Використання таких технологій сприятиме зниженню залежності від викопного палива, зменшенню викидів парникових газів і досягненню цілей сталого розвитку.

Ключові слова: *гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор; гібридна система енергопостачання, теплова ефективність, електрична ефективність, сонячне випромінювання, енергопостачання.*

S. P. SHAPOVAL
Doctor of Technical Sciences,
Professor at the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-4985-0930

S. Y. MYSAK
Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Heat and Power Engineering,
Thermal and Nuclear Power Plants
Lviv Polytechnic National University
ORCID: 0000-0003-2064-7015

INVESTIGATION OF THE THERMAL EFFICIENCY OF A HYBRID THERMAL-PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR

The article investigates the efficiency of using a hybrid thermal photovoltaic solar collector (HTPSC) in a heating system. The main objective of the study is to analyze the key parameters that determine the thermal efficiency of the hybrid solar collector, as well as to examine its design for enhancing thermal performance.

The study discusses the main challenges associated with the use of traditional energy sources and the necessity of transitioning to renewable energy in accordance with European environmental initiatives. It is determined that modern photovoltaic panels convert only 15–20 % of the absorbed solar energy into electricity, while the rest is lost as heat. This necessitates the development of innovative solutions to improve the overall efficiency of energy supply systems, particularly by enhancing hybrid solar collectors.

A series of experiments were conducted to analyze the impact of key factors–solar radiation intensity, collector tilt angle, and heat transfer fluid mass flow rate – on the thermal and electrical efficiency of the HTPSC. The results confirm that as radiation intensity increases, the thermal efficiency of the solar collector decreases. It was found that the use of solar radiation concentrators and effective thermal insulation helps to reduce heat losses and improve the system's overall efficiency.

Based on the research findings, structural solutions for hybrid collectors are proposed to enhance solar energy conversion efficiency and ensure more stable energy supply. The implementation of such technologies will contribute to reducing dependence on fossil fuels, lowering greenhouse gas emissions, and achieving sustainable development goals.

Key words: *hybrid thermal photovoltaic solar collector; hybrid power supply system, thermal efficiency, electrical efficiency, solar radiation, energy supply.*

Постановка проблеми

У рамках реалізації цілей European Green Deal [1], у 2019 р. країнами Європи було ухвалено пакет законодавчих норм «Clean energy for all Europeans package» [2]. Цей комплекс правил для впровадження в національне законодавство країн-членів ЄС став важливим кроком у виконанні "Energy Union Strategic Framework" [3], представленої ще у 2015 р. Однією з ключових цілей цього пакету є, крім визначеної в «The 2030 climate and energy framevork» [4] мети скорочення викидів парникових газів (ПГ) мінімум на 40 % до 2030 р. та до 80–95 % до 2050 р. порівняно з рівнем 1990 р., підвищення енергоефективності та стимулювання використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Наприклад, згідно з Директивою ЄС 2018/2002 щодо енергетичної ефективності, до 2030 р. передбачено підвищення показників енергоефективності на понад 32,5 % від поточного рівня. Водночас, керуючись Директивою ЄС 2018/2001 про заохочення використання ВДЕ, поставлено завдання досягти 32 % частки відновлюваної енергії у валовому кінцевому споживанні до 2030 р. Управління цими процесами відбуватиметься відповідно до Регламенту ЄС 2018/1999 про Енергетичний союз і кліматичні дії через Інтегровані національні енергетичні та кліматичні плани на 2021–2030 рр., а також довгострокові Стратегії низьковуглецевого розвитку кожної країни-члена європейської спільноти.

У серпні 2021 р. було представлено новий пакет законодавчих ініціатив «Fit for 55» [5], спрямований на уточнення й перегляд існуючого законодавства країн ЄС, щоб забезпечити виконання цілей European Climate Law [6] і підтримати реалізацію European Green Deal. Крім зменшення кількості викидів ПГ, до ключових пропозицій належить збільшення частки виробництва енергії з ВДЕ до 40 % (замість попередніх 32 %) до 2030 р., скорочення первинного споживання енергії на 39–41 %, а кінцевого – на 36–37 %. Також заплановані реформи системи торгівлі викидами ЄС (EU ETS) та інші комплексні заходи для досягнення нових екологічних орієнтирів.

Унаслідок дестабілізації світового енергетичного ринку, Європейська комісія затвердила план REPowerEU [7]. Ця ініціатива спрямована на зменшення споживання енергії, розвиток чистої енергетики та диверсифікацію джерел енергопостачання з метою прискорення переходу на відновлювану енергію, підвищення енергетичної незалежності країн ЄС і скорочення залежності від імпорту викопного палива, особливо російського. Захід також спрямований на те, щоб агресор не міг використовувати енергоресурси як політичну або економічну зброю. У рамках цього плану передбачається поетапна відмова від російських видів викопного палива до 2030 р., поряд із вирішенням питань кліматичної кризи. До 2030 р. план REPowerEU включає наступні цілі: обов'язкове облаштування нових будівель сонячними панелями; надання рекомендацій щодо скорочення енергоспоживання та збільшення загальноєвропейської мети з енергоефективності з 9 % до 13 %; підвищення частки енергії з ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні до рівня 40–45 % завдяки активному розвитку вітрових та сонячних електростанцій; розширення виробництва біометану та розвиток низьковуглецевої водневої енергетики, що включає будівництво нових електролізерів. Цей захід дозволить виробляти 10 млн т. відновлюваного водню для промисловості та вирішити проблеми його транспортування і споживання.

Країни-члени ЄС мають врахувати ці цілі у своїх національних планах, розробивши політики для їх реалізації. Відповідно до European Climate Law, оновлені національні стратегії повинні були бути подані на розгляд Єврокомісії до кінця червня 2023 р.

Головною метою цивілізованих країн залишається трансформація економіки задля мінімізації негативного впливу зміни клімату. Для цього необхідне вдосконалення державної політики, спрямованої на досягнення ухвалених ООН цілей сталого розвитку [8] та реалізацію вищеописаних стратегій. Також важливо створити правові та інституційні передумови для переходу до низьковуглецевої економіки із забезпеченням балансу між економічною, енергетичною та екологічною безпекою, а також підвищенням рівня життя громадян.

Довгий час економічний розвиток української держави характеризувався нераціональним використанням природних ресурсів і недбалим ставленням до оточуючого середовища. Це було значною перепоною для досягнення

збалансованого й сталого розвитку, згідно [8]. Проте взяті на себе міжнародні зобов'язання, зміни в українському суспільстві та прагнення створити демократичну, конкурентоспроможну, з верховенством права державу, зумовили нову стратегічну мету. Зокрема, уряд України сьогодні стикається з амбітним завданням якнайшвидшого виконання положень Угоди про Асоціацію з ЄС. Захист довкілля та клімату, згідно Paris Agreement [9] – одні з головних пріоритетів у процесі переговорів щодо повноцінного членства країни в Євросоюзі. Попри збільшення викидів парникових газів і забруднюючих речовин через військову агресію північного сусіда [10], стратегія повоєнного відновлення орієнтована на створення чистого та безпечного довкілля, просування European Green Deal й розбудову економіки за принципами сталого розвитку.

Саме тому для розв'язання вищенаведених проблем сьогодні є дуже важливим розвиток ВДЕ, а саме сонячної енергетики.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Завдяки актуальності вирішення екологічних проблем в рамках Paris Agreement рекомендується відмовлятися від традиційних вуглеводневих палив і переходити на відновлювальну енергетику. Особлива увага надається розвитку сонячної енергії, потужність генерації електричної та теплової енергії від якої прогнозується збільшити майже вдвічі до 2030 р. [11, 12]. Саме тому актуальним є вдосконалення існуючих та розроблення нових систем постачання сонячної енергії.

Найбільш поширеними типами сонячних колекторів є плоскі пластинчасті сонячні колектори, вакуумно-трубчасті сонячні колектори, а також гібридні системи фотоелектрично-теплових сонячних колекторів. Ці типи відрізняються за конструктивними особливостями, рівнем ефективності та методологіями тестування, які були детально розглянуті у попередніх дослідженнях [13]. Наприклад, для плоских сонячних колекторів характерною є відносно низька швидкість передачі тепла, що зумовлено невисоким коефіцієнтом конвективної теплопередачі між робочою рідиною та поверхнею поглинача. Підвищення ефективності таких колекторів може бути досягнуте шляхом розширення площі теплообміну, використання матеріалів із високою теплопровідністю, збільшення тривалості контакту повітря з теплообмінними елементами, створення турбулентності у потоці рідини або модифікації траєкторії її руху [13, 14].

У роботі [15] проаналізовано продуктивність і ефективність гібридного плоского сонячного колектора, оснащеного фазоперемінним матеріалом та радіатором. Результати дослідження свідчать, що такі колектори забезпечують триваліше виробництво гарячої води у вечірній час, а також характеризуються зниженою вихідною температурою вранці.

Енергетичні сектори провідних країн активно впроваджують гібридні фотоелектрично-теплові сонячні системи, які дозволяють отримувати тепло та електроенергію з єдиного джерела сонячного випромінювання. У традиційних рішеннях ці завдання виконуються окремими системами: тепловими сонячними колекторами та фотоелектричними панелями. Фотоелектричні панелі конвертують сонячне світло в електричну енергію, тоді як теплові колектори спрямовані на виробництво теплової енергії. Гібридні системи поєднують ці функції, забезпечуючи роботу виключно за рахунок сонячної енергії. Втім, попри очевидні переваги, їх впровадження супроводжується певними труднощами. Основними обмеженнями є нерівномірне охолодження, відносно низька ефективність, висока вартість обладнання, складність інтеграції з наявними даховими конструкціями, а також необхідність виділення значного простору для розміщення компонентів окремих систем [15, 16].

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження теплотехнічних характеристик розробленого гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК) та виявлення факторів, які покращують його теплову та фотоелектричну ефективність.

Викладення основного матеріалу дослідження

У статті розглянуто роботу комбінованої системи енергопостачання з гібридним тепловим фотоелектричним геліоколектором (ГСЕ з ГТФГК), принципова схема якої зображена на рис. 1.

На рис. 1 ГСЕ з ГТФГК складається з двох окремих блоків, а саме з гібридного теплового фотоелектричного колектора (ГТФГК), що містить теплофотоелектричну 2 і теплову частину 6, та теплового акумулятора (ТА) 11, які з'єднані між собою трубопроводами нагрітого 9 та охолодженого теплоносія 10. Циркуляція води, що служить теплоносієм в даній системі, відбувається за допомогою насоса 12, який переміщає поглинуту теплову енергію сонячного випромінювання 1 до ТА, а далі вона надходить до споживачів. Робота циркуляційного насоса керується блоком управління 13 на основі даних з термодатчиків 8 на виходах з ГТФГК та ТА. Для запобігання втратам тепла та підвищення теплової ефективності в конструкції ГТФГК передбачені теплоізолятор 3 та концентратори сонячного випромінювання 7. Установка виробляє електричну енергію завдяки фотоелементам 4, на які потрапляє сонячне випромінювання через світлопрозоре покриття 5.

Експериментальні дослідження функціонування геліосистеми здійснювалися за температури навколишнього повітря 15 °С. Площина ГТФГК була строго орієнтована перпендикулярно до напрямку сонячного випромінювання. Вхідні та вихідні параметри системи реєстрували через інтервали у 5 хвилин. Протягом усього періоду проведення кожного експерименту масова витрата теплоносія залишалася незмінною. Дослідження ГСЕ з ГТФГК проводились

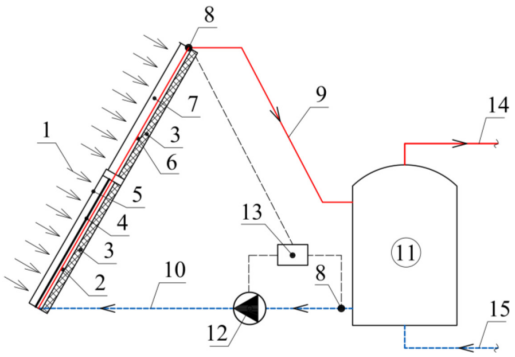


Рис. 1. Принципова схема дослідної ГСЕ з ГТФГК: 1 – джерело сонячного випромінювання; 2 – теплофотоелектрична частина гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – теплоізолятор; 4 – фотоелементи; 5 – захисне скло; 6 – теплова частина ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – термодатчики; 9, 10 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія; 11 – тепловий акумулятор (ТА); 12 – циркуляційний насос; 13 – блок управління; 14, 15 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в контурі споживача

за постійних кута нахилу ГТФГК до горизонту β та інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m рівних 50° та 500 Вт/м² відповідно.

Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$ в залежності від масової витрати G, кг/с, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α = 50°, зображена на рисунку рис. 2.

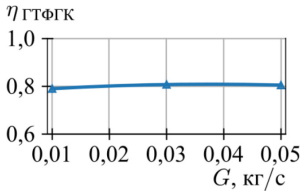


Рис. 2. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$ від масової витрати G при α = 50°, β = 50°, L_m = Вт/м²

Згідно рис. 2, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 50° теплова ефективність ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$ майже не залежить від масової витрати теплоносія в ньому G і знаходиться в межах від від 0,79 до 0,81.

На рис. 3 на основі експериментальних досліджень зображена зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$, яка залежить від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α, град, для питомої масової витрати теплоносія G = 0,015 кг/(м² · с)

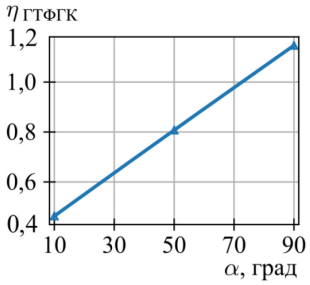


Рис. 3. Залежність теплової ефективності ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при G = 0,015 кг/(м² · с), β = 50°, L_m = Вт/м²

При питомій масовій витраті теплоносія G рівній 0,015 кг/(м² · с), теплова ефективність ГТФГК, графік якої зображений на рис. 3, рівномірно зростає на 0,2 при збільшенні азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана на 23°: з 0,46 при γ дорівнює 10° до 0,81 при 50°, до 1,15 при 90°, демонструючи загальне зростання в 2,5 раза.

Графічна залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ від масової витрати теплоносія G, кг/с, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\alpha = 50°$, зображена на рисунку рис. 4.

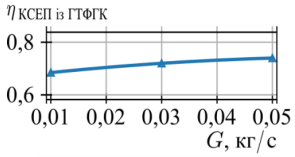


Рис. 4. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ від масової витрати теплоносія G при $\alpha = 50°$, $\beta = 50°$, L_m = Вт/м²

Згідно рис. 4, при азимутальному куті відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 50°, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ повільно зростає від 0,67 при питомій масовій витраті теплоносія в установці $G = 0{,}005$ кг/(м² · с) до 0,71 при $G = 0{,}015$ кг/(м² · с) і до 0,73 при $G = 0{,}025$ кг/(м² · с), загалом збільшившись на 9 %.

На рис. 5 зображено залежність зміни теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α, град, для питомої масової витрати теплоносія $G = 0{,}015$ кг/(м² · с).

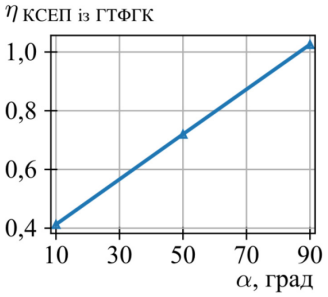


Рис. 5. Залежність теплової ефективності ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ від азимутального кута віхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при $G = 0{,}015$ кг/(м² · с), $\beta = 50°$, L_m = Вт/м²

З аналізу рис. 5, випливає, що для питомої масової витрати теплоносія G, що дорівнює 0,015 кг/(м² · с), зі зростанням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 10° до 90°, теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ рівномірно зростає на 0,15 через кожних 20°.

На основі експериментальних даних побудована графічна залежність електричної ефективності ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ від масової витрати теплоносія G, кг/с, для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана $\alpha = 50°$, яка зображена на рисунку рис. 6.

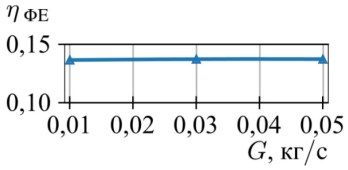


Рис. 6. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ від масової витрати теплоносія G при $\alpha = 50°$, $\beta = 50°$, L_m = Вт/м²

Згідно рис. 6 для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α рівному 50° його електрична ефективність фотоелементів $\eta_{ФЕ}$ не залежить від масової витрати G, маючи постійне значення 0,137.

На рис. 7 побудована залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α, град, для питомої масової витрати теплоносія $G = 0{,}015$ кг/(м² · с).

З аналізу рис. 7 видно, що для питомої масової витрати теплоносія G, що дорівнює 0,015 кг/(м² · с), зі зростанням азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α електрична ефективність його фотоелементів $\eta_{ФЕ}$ інтенсивно зростає в 7,5 раза: в 5,7 раза – з 0,024 при 10° до 0,137 при 50° та ще на 30 % – до 0,179 при 90°.

Висновки

При куті нахилу ГТФГК до горизонту β рівному 50° та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m рівній 500 Вт/м² його теплова ефективність $\eta_{m,\ ГТФГК}$ майже не залежить від питомої масової витрати

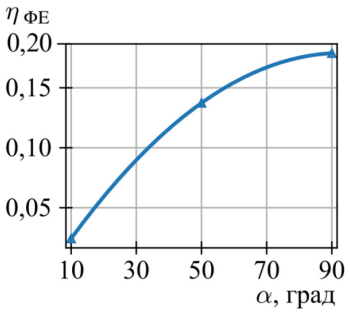


Рис. 7. Залежність електричної ефективності фотоелементів ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ від азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α при G = 0,015 кг/(м² · с), β = 50°, L_m = Вт/м²

теплоносія в ньому G та у 2,5 разів рівномірно зростає при збільшенні кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 10° до 90°. Теплова ефективність ГСЕ з ГТФГК $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ зростає на 9 % при збільшенні G у 5 разів, з 0,005 кг/(м² · с) до 0,025 кг/(м² · с), а при збільшенні α з 10° до 90° $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ зростає так само, як $\eta_{m,\ ГТФГК}$. Електрична ефективність ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ не залежить від розглянутих в статті значень G та в 5,7 разів інтенсивно зростає зі збільшенням α з 10° до 50° та ще на 30 % з його збільшенням до 90°.

Отже, на теплову $\eta_{m,\ ГТФГК}$ та електричну ефективність ГТФГК $\eta_{ФЕ}$ майже не впливає зміна питомої масової витрати теплоносія в ньому G та в 7,5 разів ці ефективності збільшує зростання кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α з 10° до 90°.

Список використаної літератури

1. European Commision. (2019). The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

2. Clean energy for all Europeans package. 2019. – https://energy.ec.europa.eu/ topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en

3. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee, the committee of the regions and the European Investment Bank a framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy /* com/2015/080 final */. – https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2015:80:FIN

4. The 2030 climate and energy framevork. – https://www.consilium.europa.eu/en/policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/

5. Fit for 55. – https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition

6. Establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No. 401/2009, and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). June 30, 2021. – https://eur-lex.europa.eu /legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021 R1119

7. European Commision. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en

8. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations. – https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf

9. Paris Agreement. United Nations, 2015. – https://treaties.un.org/doc/Treaties/ 2016/02/20160215%200603%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf

10. Міндовкілля: Війна росії проти України пришвидшує зміну клімату та спричиняє збільшення викидів парникових газів. – https://www.kmu.gov.ua/ news/mindovkillia-viina-rosii-proty-ukrainy-pryshvydshuie-zminu-klimatu-ta-sprychyniaie-zbilshennia-vykydiv-parnykovykh-haziv

11. Stec M., Grzebyk M. (2022) Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union. Energies, 15, 1-18. https://doi.org/10.3390/en15218278

12. Cantarero M. M. V. (2020) Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries, Energy Res. Social Sci. 70. DOI: https://doi.org/10.1016/j.erss.2020.101716

13. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. (2020) Comparison of solar collector testing methods – theory and practice, Processes, 8, 1–29. https://doi.org/10.3390/ pr8111340

14. Algarni S. (2023) Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink. Case Studies in Thermal Engineering. 45. https://doi.org/10.1016/j.csite. 2023.102892

15. Francesconi M., Antonelli M., Desideri U. (2023) Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power. Thermal Science and Engineering Progress, 40, https://doi.org/10.1016/j.tsep. 2023.101740

16. Hamdan M.A., Abdelhafez E., Ahmad R., Aboushi A.R. (2014) Solar Thermal Hybrid Heating System, Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East, December 2014, Beirut, Lebanon, 1–11.

17. Abdelhafez E.A., Hamdan M.A., and. Al Aboushi A.R. (2016) Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. Conference: 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8), Afyonkarahisar, Turkey, May 2016, 1–6.

References

1. European Commision. (2019). The European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

2. Clean energy for all Europeans package. 2019. – https://energy.ec.europa.eu/ topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans-package_en

3. Communication from the commission to the European Parliament, the council, the European economic and social committee, the committee of the regions and the European Investment Bank a framework strategy for a resilient energy union with a forward-looking climate change policy /* com/2015/080 final */. – https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2015:80:FIN

4. The 2030 climate and energy framevork. – https://www.consilium.europa.eu/en/ policies/climate-change/2030-climate-and-energy-framework/

5. Fit for 55. – https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition

6. Establishing the framework for achieving climate neutrality and amending Regulations (EC) No. 401/2009, and (EU) 2018/1999 (European Climate Law). June 30, 2021. – https://eur-lex.europa.eu /legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021 R1119

7. European Commision. (2019). REPowerEU: affordable, secure and sustainable energy for Europe. – https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en

8. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. A/RES/70/1. United Nations. – https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf

9. Paris Agreement. United Nations, 2015. – https://treaties.un.org/doc/Treaties/ 2016/02/20160215%200603%20PM/Ch_XXVII-7-d.pdf

10. Russia's War against Ukraine Accelerates Climate Change and Increases Greenhouse Gas Emissions. – https://www.kmu.gov.ua/news/mindovkillia-viina-rosii-proty-ukrainy-pryshvydshuie-zminu-klimatu-ta-sprychyniaie-zbilshennia-vykydiv-parnykovykh-haziv

11. Stec M., Grzebyk M. (2022) Statistical Analysis of the Level of Development of Renewable Energy Sources in the Countries of the European Union. Energies, 15, 1–18. https://doi.org/10.3390/en15218278

12. Cantarero M.M.V. (2020) Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: a roadmap to accelerate the energy transition in developing countries, Energy Res. Social Sci. 70. DOI: https://doi.org/10.1016 j.erss.2020.101716

13. Obstawski P., Bakon T., Czekalski D. (2020) Comparison of solar collector testing methods – theory and practice, Processes, 8, 1–29. https://doi.org/10.3390/ pr8111340

14. Algarni S. (2023) Evaluation and optimization of the performance and efficiency of a hybrid flat plate solar collector integrated with phase change material and heat sink. Case Studies in Thermal Engineering. 45. https://doi.org/10.1016/j.csite. 2023.102892

15. Francesconi M., Antonelli M., Desideri U. (2023) Assessment of the optical efficiency in solar collectors: Experimental method for a concentrating solar power. Thermal Science and Engineering Progress, 40, https://doi.org/10.1016/j.tsep. 2023.101740

16. Hamdan M.A., Abdelhafez E., Ahmad R., Aboushi A.R. (2014) Solar Thermal Hybrid Heating System, Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East, December 2014, Beirut, Lebanon, 1–11.

17. Abdelhafez E.A., Hamdan M.A., and. Al Aboushi A.R. (2016) Simulation of Solar Thermal Hybrid Heating System Using Neural Artificial Network. Conference: 8th International Ege Energy Symposium and Exhibition (IEESE-8), Afyonkarahisar, Turkey, May 2016, 1–6.

УДК 621.319.3 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.38

В. В. ШЕВЧУК
PhD, науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-0535-2630

В. В. КУЧАНСЬКИЙ
кандидат технічних наук, завідувач відділу
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-6473-9478

В. І. КОШМАН
кандидат технічних наук, науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0001-6473-9478

Л. Р. САБАРНО
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-2153-2183

І. М. СЕВАСТЮК
молодший науковий співробітник
Інститут електродинаміки Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-1971-3345

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЛЕ ДО ПРОВАЛІВ НАПРУГИ, СТРИБКУ ФАЗОВОГО КУТА ТА ТОЧОК ПОЧАТКУ ТА ЗАКІНЧЕННЯ ПРОВАЛІВ

Проблема забезпечення якості електроенергії стає все більш актуальною з впровадженням різноманітних відновлюваних джерел енергії, потужних нелінійних споживачів та децентралізацією систем електропостачання. Ці зміни ускладнюють завдання забезпечення стійкого електропостачання, що призводить до значних втрат від погіршення якості електроенергії. На тлі змін у господарському механізмі енергетики проблема зниження втрат електроенергії в електричних мережах залишається актуальною, ставши важливим завданням для забезпечення фінансової стабільності енергопостачальних організацій. Рівень втрат електроенергії в електричних мережах є ключовим показником економічності їхньої діяльності та ефективності систем обліку електроенергії. Цей показник вказує на проблеми, які потребують термінового вирішення у сфері розвитку, реконструкції та технічного оновлення електричних мереж, вдосконалення методів їхньої експлуатації та управління, підвищення точності обліку електроенергії та ефективності збору коштів за спожиту електроенергію. Якість електроенергії має вирішальне значення для безперебійної роботи сучасних електричних систем та електроніки. Зростання електричного навантаження та поширення електронних пристроїв призводять до збільшення спотворень у напрузі та струмі, що може спричинити серйозні проблеми в роботі обладнання та підвищити ризик виникнення аварійних ситуацій. Для забезпечення надійності та стабільності електропостачання необхідно розробляти та вдосконалювати методи та засоби визначення наявності та корекції спотворень якості електроенергії. Аналіз та класифікація провалів напруги є необхідним для ідентифікації відмов та вчасної реакції на них. Розробка систем моніторингу, зокрема на основі моделей просторового вектору, дозволяє забезпечити постійний контроль за параметрами електроенергії та вчасно реагувати на будь-які аномалії.

Ключові слова: *якість електроенергії, несиметричні джерела спотворення, провали напруги, спотворення якості електричної енергії,, режими електроспоживання.*

V. V. SHEVCHUK
PhD, Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-0535-2630

V. V. KUCHANSKY
Ph.D., Senior Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-6473-9478

V. I. KOSHMAN
Ph.D. in Engineering, Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0001-6473-9478

L. R. SABARNO
Ph.D. in Engineering, Senior Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0002-2153-2183

I. M. SEVASTYUK
Junior Researcher
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine
ORCID: 0000-0003-1971-3345

ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF THE ELECTROMAGNETIC RELAY TO VOLTAGE FALLS, PHASE ANGLE JUMPS, AND THE POINTS OF BEGINNING AND END OF FALLS

The problem of ensuring the quality of electricity is becoming increasingly relevant with the introduction of various renewable energy sources, powerful nonlinear consumers and decentralization of electricity supply systems. These changes complicate the task of ensuring a stable electricity supply, which leads to significant losses from deterioration in the quality of electricity. Against the background of changes in the economic mechanism of the energy sector, the problem of reducing electricity losses in electricity networks remains relevant, becoming an important task for ensuring the financial stability of energy supply organizations. The level of electricity losses in electricity networks is a key indicator of the efficiency of their activities and the efficiency of electricity metering systems. This indicator indicates problems that require urgent solutions in the field of development, reconstruction and technical renewal of electricity networks, improvement of methods of their operation and management, increasing the accuracy of electricity metering and the efficiency of collecting funds for consumed electricity. The quality of electricity is crucial for the uninterrupted operation of modern electrical systems and electronics. The growth of electrical load and the spread of electronic devices lead to an increase in voltage and current distortions, which can cause serious problems in the operation of equipment and increase the risk of emergency situations. To ensure the reliability and stability of power supply, it is necessary to develop and improve methods and means of determining the presence and correction of power quality distortions. Analysis and classification of voltage dips is necessary for identifying failures and responding to them in a timely manner. The development of monitoring systems, in particular based on spatial vector models, allows for constant monitoring of electricity parameters and timely response to any anomalies.

Key words: *power quality, asymmetrical sources of distortion, voltage dips, distortion of the quality of electrical energy, power consumption modes.*

Постановка проблеми

У сучасних електроенергетичних системах, точка початку провалу є важливим показником, що визначає стійкість та надійність електрообладнання. Цей термін використовується для опису випадків, коли напруга спадає нижче нормального рівня на певний час, який може тривати від декількох мілісекунд до декількох секунд.

Початок провалу може виникати з різних причин, включаючи перевантаження в електричній мережі, зміни навантаження, короткі замикання або викиди. Коли такі події відбуваються, напруга в мережі може раптово спадати, що може мати серйозний вплив на електрообладнання [1–2].

Слід враховувати, що точка початку провалу може бути особливо критичною для деяких типів обладнання, особливо для чутливих пристроїв, таких як комп'ютери, медичне обладнання або обладнання з автоматичним управлінням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Як приклад, у [3–4] ряд реле, пускачів двигунів і контакторів були випробувані з використанням двох значень точки початку провалу як параметрів (0 і 90°). Вища чутливість визначалась для провалів напруги, коротших ніж 4–5 циклів з 90° точкою початку провалу, ніж для тих самих провалів з 0° точкою початку провалу напруги. Для провалів тривалістю більше 5 циклів чутливість вища для 0° точки початку провалу, ніж для 90° точки. Подальші дослідження показали, що більшість провалів напруги тривають від 5 до 30 циклів, і тому рекомендується перевіряти реле, пускачі двигунів і контактори з 0° точкою початку провалу напруги.

Формулювання мети дослідження

Аналіз сприйнятливості електроприймачів до короткочасних випадкових провалів напруги, які визначається їх інерційністю, тобто часом, протягом якого здатні зберегти запасену енергію електромагнітного чи електростатичного поля.

Викладення основного матеріалу дослідження

Спотворення якості електроенергії – це відхилення від нормальних параметрів електричної енергії, яке може виникати внаслідок різних фізичних або технічних причин. Це може включати в себе такі явища, як гармоніки, перепади напруги, високі рівні шуму, флікер, недостатній фактор потужності тощо. Такі спотворення можуть впливати на електричні системи та прилади, що використовуються в промисловості, комерції або побуті, та можуть призводити до різноманітних проблем [7].

Аналізуючи результати досліджень також представлених в [5], показано, що положення точки початку провалу суттєво впливає на чутливість контакторів котушки змінного струму до провалів напруги (рис. 1).

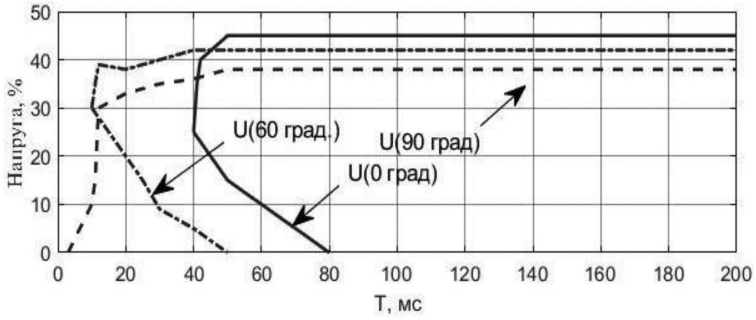


Рис. 1. Вплив точки початку провалу на чутливість провідника (без зсуву фази) [8]

Як слідує із рис. 1, контактор більш чутливий до глибоких провалів напруги з 90° точкою на хвилі, ніж до тих же провалів з 0° точкою початку провалу. Найпомітніший вплив точки початку провалу призводить до виникнення високого пускового струму під час відновлення номінальних умов електропостачання після завершення провалу (рис. 2).

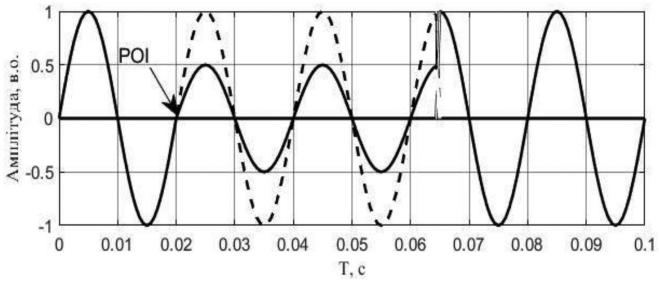


Рис. 2. Провал напруги з 0° точкою його початку [19]

Електромагнітне реле (ЕМР) – це пристрій, який використовується для керування електричними контактами за допомогою електромагнітних полів. Воно складається з котушки з ізольованим проводом, що намотана на магнітний сердечник, і контактів, які рухаються під впливом цього поля, відкриваючи або закриваючи електричне коло. Принцип дії ЕМР полягає в тому, що під час подачі електричного струму на котушку вона створює магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник, викликаючи його рух. Цей рух змінює положення контактів, що призводить до відкриття або закриття електричного кола.

ЕМР широко застосовується в промислових системах управління та зв'язку як свого роду базовий електричний компонент, який також відіграє роль у комутаційних ланцюгах, передачі сигналів та усуненні перешкод. Однак, коли в електромережі виникає коротке замикання це спричиняє проблеми з якістю електроенергії, такі як падіння напруги та короткі переривання [1, 5, 6], які впливають на нормальну роботу ЕМР.

Вважаючи вищеозначене, в роботі проведені дослідження роботи ЕМР при наявності провалів, POW (POR, POI) та PAJ.

Механізм реагування ЕМР на провал напруги ґрунтується на його основному принципі дії, що базується на використанні електромагнітного поля для керування перемиканням контактів. Коли на котушку ЕМР подається електричний струм, це створює магнітне поле, яке впливає на магнітний сердечник.

Під час провалу напруги, коли електричний струм або напруга падають нижче певного рівня, струм через котушку ЕМР може також зменшитися або втратити. Це призводить до втрати магнітного поля, яке утримувало контакти у потрібному стані.

У результаті, магнітний сердечник може відпустити свою позицію під дією сили пружини або іншого механізму, що призведе до зміни положення контактів. Це може призвести до відкриття або закриття електричного кола, залежно від конфігурації ЕМР.

ЕМРФ – це електромеханічні реле, робота яких заснована на дії магнітного поля нерухомої обмотки зі струмом на рухомий феромагнітний елемент (якір). Коли подається синусоїдальне живлення змінного струму, основний потік котушки змінного струму змінюється синусоїдально з часом:

$$F = \Phi_m \sin(\omega t). \tag{1}$$

Електромагнітна сила розраховується за допомогою електромагнітної сили Максвелла:

$$F_{mag} = \frac{\Phi^2}{2\mu_0 S}, \tag{2}$$

де S – площа магнітного притягання в повітряному зазорі, μ_0 – проникність вакууму.

Таким чином, згідно з рівняннями (1) та (2), Fmag можна записати як:

$$F_{mag} = \frac{\Phi_m^2 \sin^2(\omega t)}{2\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2}{4\mu_0 S} = \frac{\Phi_m^2 \cos(2\omega t)}{4\mu_0 S}. \tag{3}$$

Із (3) слідує, що F_{mag} пропорційний квадрату основного потоку і змінюється в залежності від часу при подвоєній частоті напруги.

На рис. 3 представлені форми сигналів – електромагнітної сили та сили пружини.

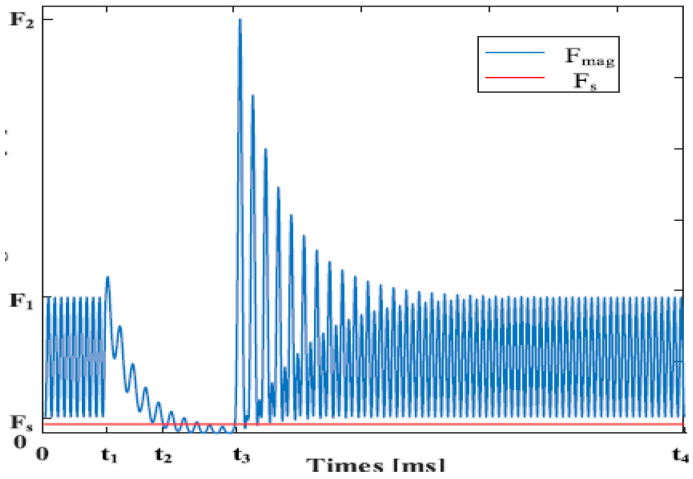


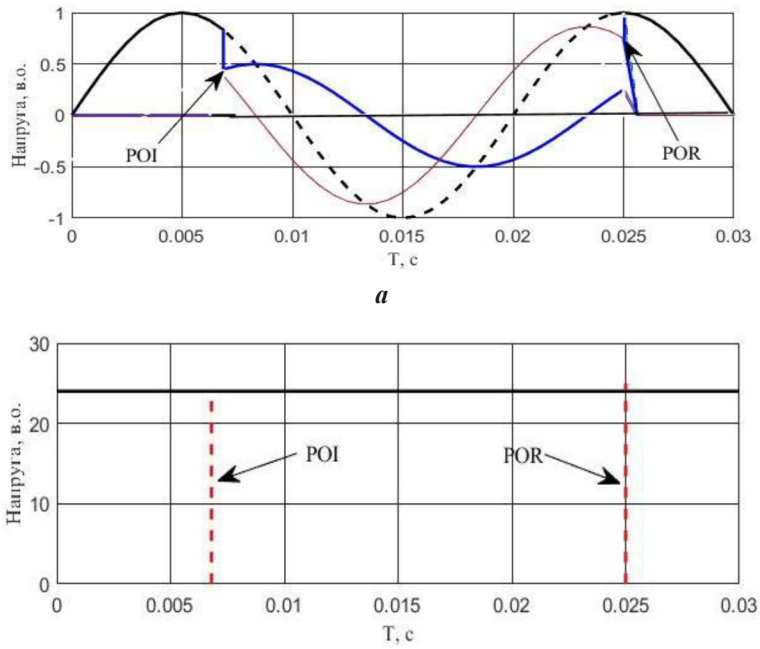
Рис. 3. Криві електромагнітної сили (F_{mag}) і сили пружини (F_s) під час провалу напруги

Перед початком провалу F_{mag} перевищує F_s, і ЕМР працює нормально. Коли провал відбувається в момент часу t_1, Fmag поступово зменшується; однак F_{mag} все ще перевищує F_s до часу t_2, і ЕМР працює нормально від t_1 до t_2. Fmag менше, ніж F_s від t_2, і ЕМР відключається від t_2 до t_3. Зниження закінчується в t_3, і ЕМР відновлюється для нормальної роботи. Це відбувається коли величина провалу напруги перевищує певний рівень і F_{mag} залишається вищим за F_s незалежно від того, скільки триває провал, і EMR може працювати стабільно [6–8]. Іншими словами, для забезпечення нормальної роботи EMR під час живлення Fmag має бути більше F_s. Таким чином, необхідно знати та кількісно визначити толерантність EMR до падіння напруги.

Крім того, різні POW і PAJ впливають на основний потік EMR, тим самим впливаючи на зміну F_{mag}. Це означає, що POW і PAJ можуть впливати на сприйнятність до ЕМР, тому при проведені тестування ЕМР потрібно брати до уваги ці характеристики.

В роботі була досліджена залежності роботи ЕМР від тривалості провалу напруги. На рис. 4 *а*, *б*, представлені провали напруги з різною тривалістю та криві спрацювання ЕМР.

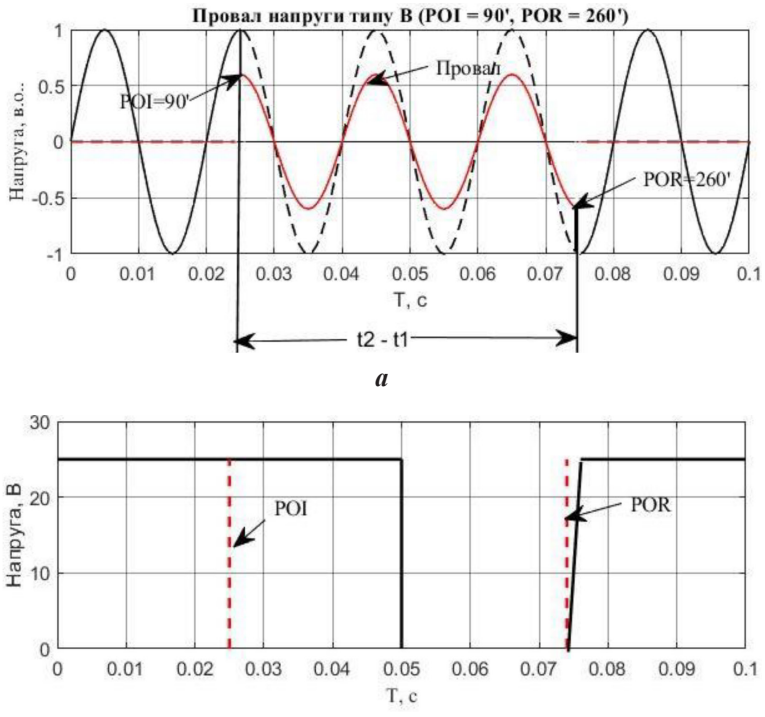
Як видно на рис. 4, *а* представлений сигнал провалу напруги з тривалістю 18 мс і в даному випадку реле не спрацювало (рис. 4, *б*). Зазвичай, реле витримує тривалість провалу 20–25 мс, а потім спрацьовує. Провал напруги тривалістю 18 мс може відбутися внаслідок різних факторів, таких як короткочасне перевантаження або імпульсне навантаження.



а

б

Рис. 4. Провал напруги з тривалістю 18 мс та крива спрацювання ЕМР



а

б

Рис. 5. Провал напруги з тривалістю 49 мс та крива спрацювання ЕМР

При наявності провалу 49 мс (рис. 5, *а*) реле спрацьовує через 25 мс після початку провалу (Точка POI). Напруга живлення навантаження знижується до 0 В, а після відновлення провалу напруги (точка POR) продовжує свою роботу.

Висновки

Для проведення моніторингу наявності спотворень якості електроенергії в електричних мережах, необхідно визначення наявності провалів напруги, ідентифікація їх типу та класифікація для визначення необхідних керуючих сигналів та засобів захисту електрообладнання.

Розроблений метод ідентифікації типу провалів напруги повинен однозначно ідентифікувати як провали, які викликані короткими замиканнями в електричній мережі, та наявністю потужного електричного обладнання.

Список використаної літератури

1. EPRI: ‘The effects of point-on-wave on low-voltage tolerance of industrial process devices’, (EPRI Brief 44, 1998)
2. EPRI: ‘Performance of a hold-in device for relays, contactors and motor starters’, (EPRI Brief 46, 1998).
3. Яремчук Н. А., Года О. Ю., Проскін В. В. Оцінювання комплексного показника якості складного об’єкта з характеристикою невизначеності. Український етрологічний журнал. 2018. No 2. С. 9–17.
4. T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, “Power quality disturbance classification using the inductive inference approach,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812–1818, Oct. 2004, doi: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822533
5. Волошко А. В., Джеря Т. Е., Шевчук В. В. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Зб. наукових праць “InterConf,” (№ 106) з матеріалами 5-ої Міжнародної науково-практичної конференції “Recent scientific investigation” (26–28 квітня 2022 року), Oslo, Norway, с. 369–376.
6. Волошко А. В., Джеря, Т. Е., Шевчук В. В. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Зб. наукових праць “InterConf,” (№ 107) з матеріалами 12-ої Міжнародної науково-практичної конференції “Science and Practice: Implementation to Modern Society” (6–8 травня 2022 року), Manchester, Great Britain, с. 510–516.
7. Шевчук В. В., Джеря Т. Е. (2022). Зниження впливу нелінійних навантажень на показники якості електричної енергії: основні способи управління параметрами енергетичних систем. Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського “Енергетика. Екологія. Людина”. Київ, с. 11–17.
8. Шевчук В. В. (2023). Механізм зменшення збитків від наявності провалів напруги за допомогою моделі просторового вектора. Міжнародний електронний науково-практичний журнал “WayScience” ISSN 2664-4819. Конференція 14–15 вересня 2023, вихід збірника тез доповідей 22.09.2023 р

References

1. On Approval of the Distribution Systems Code https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18#Text
2. Kuznetsov V. G., Shpolianskyi O. G., Yaremchuk N. A. Generalized indicator of energy quality in electrical networks and systems. Tekhnichna elektrodynamika. 2011. No. 3. Pp. 46–52. (Ukr)
3. Yaremchuk N. A., Goda O. Yu., Proskin V. V. Evaluation of a complex indicator of the quality of a complex object with a characteristic of uncertainty. Ukrainian Metrological Journal. 2018. No 2. Pp. 9–17. (Ukr)
4. T. K. Abdel-Galil, M. Kamel, A. M. Youssef, E. F. El-Saadany and M. M. A. Salama, “Power quality disturbance classification using the inductive inference approach,” in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 4, pp. 1812–1818, Oct. 2004, doi: https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.822533
5. Voloshko A. V., Dzherya T. E., Shevchuk V.290V. (2022). Problems of determining the presence of distortions of electric power quality. Collection of scientific papers “InterConf,” (№ 106) with materials of the 5th International Scientific and Practical Conference “Recent scientific investigation” (April 26–28, 2022), Oslo, Norway, pp. 369–376.
6. Voloshko A. V., Dzherya, T. E., Shevchuk V. V. (2022). The formation of the vector of classification features of electric power quality distortions. Collection of scientific papers “InterConf,” (№ 107) with materials of the 12th International Scientific and Practical Conference “Science and Practice: Implementation to Modern Society” (May 6–8, 2022), Manchester, Great Britain, pp. 510–516.
7. Shevchuk V. V., Dzherya T. E. (2022). Reducing the impact of nonlinear loads on the quality of electricity: basic methods of managing the parameters of energy systems. Collection of scientific works of the Institute of Electrical Engineering, Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute “Energy. Ecology. Man”. Kyiv, pp. 11–17.
8. Shevchuk V. V. (2023). Mechanism for reducing losses from the presence of voltage dips using a spatial vector model. International electronic scientific and practical journal “WayScience” ISSN 2664-4819. Conference September 14–15, 2023, publication of the collection of abstracts 09/22/2023.

УДК 656.614.075.2”43” DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.39

О. Г. ШИБАЄВ
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень
Одеський національний морський університет
ORCID: 0009-0004-8881-3803

ФОРМАЛІЗАЦІЯ РІШЕНЬ ЩОДО УПРАВЛІННЯ МОРСЬКИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ У ТРАНСПОРТНІЙ МЕРЕЖІ

В статті наведені результати рішення задачі оцінки потреб у транспортних засобах прі управлінні морськими перевезеннями у транспортній мережі. Запропонована економіко-математична модель задачі лінійного цілісного програмування. Розкрито експлуатаційно – економічний зміст цільової функції та структурних обмежень. Вказані існуючі методи її рішення. Надано методичні рекомендації щодо визначення довірчого інтервалу зміни обсягу перевезень. Показано місце завдання визначення потреби у тоннажі при перспективному формуванні рішень щодо перевезення (доставки) вантажів одержувачу. Вказується, що задачі розрахунку й обґрунтування потреби у тоннажу, а також варіантів морської доставки одержувачу, зовнішньоторговельних і транзитних вантажів експедиторськими компаніями є одними з центральних. Вони визначається специфікою цієї виробничої діяльності на ринку транспортних послуг. В роботі сформульована змістова характеристика задачі. Отримані формалізована постановка та економіко – математична модель визначення оптимальної структури і состава флоту. Розкрите економічний зміст структурних обмежень. Врахована сезонність перевезень вантажів. Встановлено, що для перевезення продукції можуть бути залучені судна різних типів, що відповідають за своїми конструктивними характеристиками виду товару, що підлягає перевезенню. Звертається увага на те, що математична модель належить до класу завдань лінійного програмування. Це вказує на її прикладний характер, тому що не потрібна розробка та реалізація алгоритмів оптимізації. Зроблено висновки, що для доставки продукції морським транспортом перед товаровиробником (експедитором) вирішено завдання визначення кількості суден, яку необхідно залучити для своєчасного та економічно виправданого транспортування вантажів споживачеві. Отримані методичні рекомендації можуть використовуватися комерційним чи транспортними підрозділами підприємств-товаровиробників для організації доставки продукції. Вони також могутть входить у загальний комплекс практичних дій виконавчих завдань маркетингу, вкладених у просування товарів від виробника до одержувачу.

Ключові слова: *вантажоперевезення, управлінські рішення, флот, морські судна, економіко-математична модель, оптимальність, методи прийняття рішень, формалізація.*

O. G. SHIBAYEV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Fleet Operation
and Maritime Transportation Technology
Odesa National Maritime University
ORCID: 0009-0004-8881-3803

FORMALIZATION OF DECISIONS REGARDING MARITIME TRANSPORTATION MANAGEMENT IN THE TRANSPORT NETWORK

The article presents the results of solving the problem of assessing the needs for vehicles when managing maritime transportation in the transport network. An economic and mathematical model of the linear integral programming problem is proposed. The operational and economic content of the objective function and structural constraints is revealed. Existing methods for its solution are indicated. Methodological recommendations are provided for determining the confidence interval for changes in the volume of transportation. The place of the problem of determining the need for tonnage is shown in the prospective formation of decisions on the transportation (delivery) of goods to the recipient. It is indicated that the problems of calculating and substantiating the need for tonnage, as well as options for maritime delivery to the recipient, foreign trade and transit cargo by forwarding companies are among the central ones. They are determined by the specifics of this production activity in the transport services market. The work formulates the content characteristics of the problem. A formalized statement and an economic and mathematical model for determining the optimal structure and composition of the fleet are obtained. The economic content of structural constraints is revealed. The seasonality of cargo transportation is taken into account. It is established that for the transportation of products, vessels of different types can be involved, corresponding in their design characteristics to the type of goods to be transported. Attention is drawn to the fact that the mathematical model belongs to the class of linear programming problems. This indicates its applied nature, since the development and implementation of optimization algorithms is not required. It was concluded that for the delivery of products by sea transport, the task of determining the number of vessels that must be involved

for the timely and economically justified transportation of goods to the consumer has been solved for the producer (forwarder). The received methodological recommendations can be used by commercial or transport departments of enterprises-producers to organize the delivery of products. They can also be included in the general complex of practical actions of executive marketing tasks invested in the promotion of goods from the producer to the recipient.

Key words: *cargo transportation, management decisions, fleet, sea vessels, economic-mathematical model, optimality, decision methods, formalization.*

Постановка проблеми

Вигідне географічне становище України, багаті земельні ресурси та чітка спрямованість на економічну інтеграцію до європейської спільноти державна політика зумовлюють необхідність вирішення питань транспортного забезпечення соціально-економічного розвитку країни. Перспективи розвитку української зовнішньої торгівлі на сучасному етапі визначаються ступенем успішності її адаптації до умов функціонування міжнародних економічних відносин, адекватністю та своєчасністю прийнятих рішень, що постійно трансформуються.

За останні роки обсяги перевезень через порти України зростають дуже повільними темпами, а іноді продовжують зменшуватися. Одна з основних причин втрати вантажопотоку полягає в затяжній кризі економічного життя та бойові дії у країни. Для стабілізації обстановки і забезпечення залучення і подальшого зростання вантажопотоків необхідно насамперед підвищити якість обслуговування вантажовласників, поліпшити стан рухомого складу та транспортної інфраструктури.

На морському і річковому транспорті практично весь обсяг перевезень, і переробки вантажів у портах виконується в міжнародному сполученні. Це привело до значного збільшення попиту на експедиторські послуги, підвищенню їх ролі, що у міжнародних перевезеннях є сполучною ланкою між продавцем і покупцем. Відомо [1–3], що використання експедиторів у процесі транспортування вантажів забезпечує рішення проблеми вибору найбільш ефективного маршруту в різних видах сполученнях за критерієм мінімум транспортних витрат. Але, перш за все, необхідно вирішити проблему, пов'язану з недостатньою обґрунтованістю кількісті морських суден, що відповідають вимогам сучасних перевезень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Окремі дослідники такі як [6–10] зверталися до проблеми обґрунтування кількісті морських суден з пропозиціями різного типу моделей для організації роботи суховантажного транспортного флоту. Прі цьому розглядалися різні типи суден [6, 7, 8] та умов їх роботи [6, 7, 9, 10]. У рукописі [6] наведено результати дослідження та дано теоретичне обґрунтування перевезень і роботи суден балкерного типу. Дослідження виконано з застосуванням лінійного програмування, теорії ігор, теорії прийняття рішень. У результаті вирішено актуальна наукова проблема з підвищення ефективності функціонування систем доставки масових вантажів міжнародного сполучення. Робота [7] відображає умови та особливості роботи універсальних суден на лінії. Зі свого боку у роботі [8] запропоновано економіко-математичну модель з обґрунтування оптимального розподілу контейнеропотоків між суднами, які обслуговують магістрально-фідерні лінії. Наведено теоретичні та методичні положення щодо пояснення рішень, пов'язаних з доцільністю освоєння факультативних контейнеропотоків суднами, що обслуговують лінії з простою та складною схемами руху тоннажу. Особлива увага звернута на створення лінійних моделей завантаження суден.

Специфіка інтермодальних перевезень досліджена у працях [9, 10]. Але залишилися без уваги питання розробки та визначення структурного складу тоннажу прі перспективному управлінні перевезеннями вантажу.

Формулювання мети дослідження

Метою статті є підвищення ефективності перевезень вантажів за рахунок застосування сучасних методів розробки управлінських рішень та їх цифровізації.

Викладення основного матеріалу дослідження

Відомо [1, 2], що транспортні процеси суттєво впливають на ефективність та стабільність виробничих циклів, на характеристики процесів кооперації та спеціалізації виробництва. У свою чергу, незадовільне транспортне обслуговування призводить до:

- втраті та псуванні товарів при доставці, перевантаженні та зберіганні;
- наявності економічно невиправданих запасів продукції та ресурсів у користувачів транспорту;
- економічні втрати, викликані не дотриманням термінів поставки продукції;
- вимушеного використання «дорогих» видів транспорту;
- доставці товару засобами, що не відповідають його транспортним характеристикам;
- обмеження обсягів виробництва та порушення його технології.

Особливе місце у загальному транспортному комплексі України належить морському флоту. Це пов'язано з тим, що морський транспорт має значні переваги проти іншими його видами. Узагальнюючи [1–10], до основних їх слід віднести:

– Висока дальність перевезення при використанні природних морських та океанічних шляхів сполучення. Пропускна їхня здатність практично не обмежена. Морські порти як кінцеві пункти морських шляхів не вимагають великих витрат на днопоглиблювальні роботи на фарватерах, акваторіях і причалів порту.

– Здатність перевозити всі види вантажів як суховантажних (генеральні, навалочні, насипні), так і наливних (нафтоналивні, хімічні, харчові).

– Висока швидкість доставки продукції за низької собівартості. Це досягається завдяки руху морських суден без затримок на трасі та малої їхньої енергоємності.

– Можливість цілорічної доставки товарів та сировини до районів країн, що мають морські узбережжя. Морський транспорт є основним, а ряді випадків – єдиним видом транспорту, що забезпечує економічні зв'язки в окремих регіонах.

– Здатність забезпечити потреби країни у перевезеннях зовнішньоторговельних вантажів. За обсягом перевезень морський транспорт, зазвичай, посідає перше місце, а, по вантажообігу – третє.

– Висока валютна ефективність експорту транспортних послуг під час перевезення вантажів іноземних фрахтувальників. Це висуває морський транспорт до основних постачальників вільно-конвертованої валюти нашій країні.

Таким чином, для доставки продукції морським транспортом перед товаровиробником (експедитором) виникає завдання визначення кількості суден, яку необхідно залучити для своєчасного та економічно виправданого транспортування вантажів споживачеві. Така проблема ефективно може вирішуватися з використанням економіко-математичної моделі лінійного цілісного програмування. Пропонується наступна формалізована постановка задачі.

Товаровиробник має запаси продукції в кількості Q_j, яку необхідно доставити одержувачу у напрямку j. У свою чергу напрямок характеризується відповідними пунктами відправлення та призначення, а також певним видом товару.

Період часу, протягом якого необхідно виконати перевезення, розділений на окремі підперіоди y для подальшого обліку сезонності кількості виробленої продукції – Q_{yj}. Причому розмір відправки по підперіодів також регламентований величиною ΔQ_{yj}, яка характеризує допустиме збільшення або зменшення планової кількості.

Для перевезення продукції можуть бути залучені судна різних типів i, що відповідають за своїми конструктивними характеристиками виду товару, що підлягає перевезення. Тоді математична модель задачі набуде наступного вигляду:

$$\sum_{y=1}^{Y}\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} S_i t_{yij} X_{yij} \to \min; \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^{m} q_{ij} X_{yij} \le Q_{yj} + Q_{yj} \quad (y = 1, 2, \ldots, Y; \quad j = 1, 2, \ldots, n); \tag{2}$$

$$\sum_{i=1}^{m} q_{ij} X_{yij} \ge Q_{yj} - Q_{yj} \quad (y = 1, 2, \ldots, Y; \quad j = 1, 2, \ldots, n); \tag{3}$$

$$\sum_{y=1}^{Y}\sum_{i=1}^{m} q_{ij} X_{yij} = Q_j \quad (j = 1, 2, \ldots, n); \tag{4}$$

$$\sum_{y=1}^{Y}\sum_{j=1}^{n} X_{yij} \le K_i \quad (i = 1, 2, \ldots, m); \tag{5}$$

$$X_{yij} = 0, 1, 2, \ldots, P \quad (y = 1, 2, \ldots, Y; \quad i = 1, 2, \ldots, m; \quad j = 1, 2, \ldots, n), \tag{6}$$

де S_i – добова орендна ставка суден типу i; t_{yij} – час рейсу судна типу i на напрямку j у підперіоді y; q_{ij} – завантаження судна типу i на напрямку j; K_i – кількість суден типу i, яку можна взяти в оренду; X_{yij} – параметр управління – характеризує кількість суден типу i, яке необхідно використовувати для доставки продукції на напрямку j у підперіоді y.

Всі інші позначення самі, як і прийняті вище.

Вираз (1) характеризує цільову функцію математичної моделі, що забезпечує мінімальні витрати на флот під час доставки продукції споживачам.

Нерівності (2)–(4) регламентують обсяги постачання товарів у цілому та за окремими підперіодами.

Обмеження (5) визначають граничні умови за кількістю суден, використання яких потенційно можливе у період часу.

За допомогою величини ΔQ_{yj} формується довірчий інтервал прогнозованих розмірів необхідних перевезень. З цією метою виконується екстраполяція динамічного ряду, що характеризує масу вантажів за роками. Визначається точковий прогноз, математичне очікування та залишкова дисперсія σ. Остання і визначає величину ΔQ_{yj}.

Запропонована модель відноситься до класу задач лінійного цілісного програмування і може вирішуватися стандартними методами, наприклад із застосуванням алгоритмів Р Гоморі або схеми «Гілок і кордонів» запропонованої А. Ленд та А. Дойг [1. 2].

Висновки

Таким чином результати вирішення задачі:

– є основою для ведення переговорів та укладання договору на перевезення з незалежними експедиторськими компаніями;

– можуть використовуватися комерційним чи транспортними підрозділами підприємств-товаровиробників для організації доставки продукції;

– у разі потреби входять у загальний комплекс практичних дій виконавчих завдань маркетингу, вкладених у просування товарів від виробника до одержувачу. При цьому передбачається складний комплекс робіт з вибору транспортних засобів та тари, складування, ефективної доставки покупцю, супроводу вантажів;

– також слід відзначити що в даний час товароруху не приділяється достатньо уваги, хоча саме в цьому процесі закладено значні резерви підвищення ефективності роботи сільськогосподарських підприємств. Тут тісно переплітаються економічні, фінансові, транспортні, юридичні, технологічні та інші питання. Тому в умовах ринку необхідно приділяти процесу руху товару не менше уваги, ніж процесу виробництва.

Список використаної літератури

1. Шибаєв О. Г., Боровік С. С., Тихоніна І. І. Основи теорії транспортних процесів і систем: Навчальний посібник. Одеса : ОНМУ, 2023. 125 с.

2. Шибаєв О. Г., Кравченко О. А., Тихоніна І. І. Управління роботою флоту: Навчальний посібник. Одеса : ОНМУ, 2023. 74 с.

3. Король В. Ю. Організація експедиторського обслуговування транспортних процесів і систем доставки вантажів у контейнерах: автореф. дис. ... к-та техн. наук: 05.22.01 /В. Ю. Король; Одес. нац. мор. ун-т. Одеса, 2019. 23 с.

4. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. Розвиток транспорту. 2021. № 4(11). С. 82–93. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.08

5. Павлова Н., Онищенко С. Організація проєктно-орієнтованого управління транспортною компанією (на прикладі транспортно–експедиторської компанії). Управління розвитком складних систем. 2020. № 42, С. 23–28. DOI: https://doi.org/10.32347/2412–9933.2020.42.23–28

6. Коскіна Ю. О. Розвиток теоретичних основ організації і управління змішаними перевезеннями масових вантажів за участю флоту: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.22.01 / Ю. О. Коскіна; Укр. держ. ун-т. залізн. трансп. Харків : 2021. 40 с.

7. Вишневський Д. О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях: дис. … канд. техн. наук : 05.22.01. Одеса, 2016. 171 с.

8. Кириллов Ю. І. Організація та управління роботою суден в контейнерній транспортно-технологічній системі: автореф. дис. … к-та. техн. наук: 05.22.01 / Ю. І. Кириллов; Одес. нац. мор. ун-т. Одеса, 2013. 24 с.

9. Drozhzhyn O. Containership Traffic Optimization on Feeder Shipping Line. Transport and Telecommunication Journal. 2016. Vol. 17(4), P. 314–321. DOI: https://doi.org/10.1515/ttj-2016-0028

10. Drozhzhyn O., Koskina Y. The Model of Container Feeder Line Organization Focused on the Nature and Parameters of External Container Flows. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. 2021. Vol. 23(2). P. 94–102. DOI: https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.A94-A102

References

1. Shibaev O. G., Borovik S. S., Tikhonina I. I. (2023) *Osnovy teorii trancportnykh procesiv i system* [Fundamentals of the theory of transport processes and systems], – Odesa : ONMU. (in Ukrainian).

2. Shibaev O. G., Kravchenko O. A., Tikhonina I. I. (2023) *Upravlinnya robotoyu floty* [Fleet management], – Odesa : ONMU. (in Ukrainian)

3. Korol V. Yu. (2019) *Orhanizatsiya ekspedytors'koho obsluhovuvannya transportnykh protsesiv i system dostavky vantazhiv u konteynerakh* [Organization of freight forwarder service for transport processes and cargo delivery systems in containers] (PhD Thesis), – Odesa : ONMU.

4. Berestenko V., Onyshchenko S. (2021) *Struktura ta kharakterystyky mul'tymodal'noyi dostavky z pozytsiyi tsyfrovizatsiyi* [Structure and characteristics of multimodal delivery from the digitalization point of view]. *Rozvitok transportu* [*Transport development*], no 4(11), pp 82–93. Retrieved from: https://doi.org/10.33082/td.2021.4-11.0810

5. Pavlova, N., Onyshchenko, S. (2020) *Orhanizatsiya proyektno–oriyentovanoho upravlinnya transportnoyu kompaniyeyu (na prykladi transportno–ekspedytors'koyi kompaniyi)* [Organization of project-oriented management of a transport company (on the example of a transport and forwarding company)]. *Upravlinnya rozvytkom skladnykh system* [Management of the development of complex systems], no 42, pp 23–28. Retrieved from: https://doi.org/10.32347/2412–9933.2020.42.23–28

6. Koskina Yu. O. (2021) *Rozvytok teoretychnykh osnov orhanizatsiyi i upravlinnya zmishanymy perevezennyamy masovykh vantazhiv za uchastyu flotu* [Development of the theoretical foundations of the organization and management of mixed transportation of bulk cargo with the participation of the fleet] (DT Thesis), – Kharkiv: UDUZT.

7. Vyshnevsky D. O. (2016) *Metodychni osnovy orhanizatsiyi roboty universal'nykh suden na mizhnarodnykh liniyakh* [Methodical bases of the organization of work of universal vessels on international lines] (PhD Thesis),– Odesa : ONMU.

8. Kirillov Yu.I. (2013) *Orhanizatsiya ta upravlinnya robotoyu suden v konteynerniy transportno-tekhnolohichniy systemi* [Organization and management of the work of vessels in the container transport and technological system] [Orhanizatsiya ta upravlinnya robotoyu suden v konteynerniy transportno-tekhnolohichniy systemi] (PhD Thesis), – Odesa: ONMU.

9. Drozhzhyn O. (2016) Containership Traffic Optimization on Feeder Shipping Line. Transport and Telecommunication Journal, vol. 17(4), pp. 314–321. Retrieved from: https://doi.org/10.1515/ttj-2016-0028

10. Drozhzhyn O., Koskina Y. (2021) The Model of Container Feeder Line Organization Focused on the Nature and Parameters of External Container Flows. Communications – Scientific Letters of the University of Zilina. vol. 23(2). pp. 94–102. Retrieved from: https://doi.org/10.26552/com.C.2021.2.A94-A102

УДК 656 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.40

О. Ю. ЮРЧЕНКО
старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0002-3047-6654

Т. П. ВОЛОШКО
старший викладач
Сумський національний аграрний університет
ORCID: 0000-0003-2605-8836

ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЛАСТИКОВИХ МАНЕКЕНІВ ПІШОХОДІВ В РАМКАХ ПРИВЕРТАННЯ УВАГИ ВОДІЇВ ПРИ РУСІ НА ПІШОХІДНИХ ПЕРЕХОДАХ

Відповідальне ставлення усіх учасників дорожнього руху один до одного є важливим елементом в використанні доріг загального користування. Пішохідні переходи вважаються одними з тих місць, де трапляється найбільше аварійних ситуацій. В даній роботі розглянуто процес функціонування пластикових пішоходів манекенів, що почали масово встановлюватися владою на проїжджій частині різних міст. В ході проведення дослідження встановлено кілька основних положень щодо ефективності їх використання. Першим із положень трактується підвищення уваги водіїв при під'їзді до пішохідного переходу, проте це відбувається лише протягом 2–4 тижнів після встановлення манекенів. Потім, звиклі водії не звертають на них увагу. Другим положенням встановлено обмеження оглядовості водіями справжніх пішоходів, що досить часто знаходяться за пластиковими манекенами в очікуванні вільної проїжджої частини. Третім положенням охарактеризовано негативну дію на водіїв через створення стресових ситуацій при огляді проїжджої частини на ходу, гальмуванні, а потім знову розгоні транспортного засобу без наявної для того необхідності у вигляді пластикових пішоходів, які нікуди не рухаються. Усі дослідження проведено в режимі реального часу з підтвердженням фотофіксацією та побудовано графік та діаграму порушень водіями правил дорожнього руху при русі через пішохідний перехід. В результаті, встановлено, що ефективність функціонування пластикових манекенів пішоходів проявляється саме протягом 2–4 тижнів після встановлення їх на проїжджій частині. Згодом, звиклі водії, які рухаються за одним і тим самим або подібними один до одного маршрутами перестають звертати увагу на наявних елементів безпеки, що встановлені з метою привертання уваги водіїв. Стосується це як водіїв легкових автомобілів, так і вантажних транспортних засобів, маршрутних таксі та автобусів, а також комунальної техніки.

Ключові слова: *водій, пішохід, учасники дорожнього руху, пішохідний перехід, пластиковий пішохід манекен, дорожні знаки, правила дорожнього руху, безпека, якість.*

O. YU. YURCHENKO
Senior Lecturer
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0002-3047-6654

T. P. VOLOSHKO
Senior Lecturer
Sumy National Agrarian University
ORCID: 0000-0003-2605-8836

FUNCTIONING OF PLASTIC PEDESTRIANS MANNEQUINS IN THE FRAMEWORK OF ATTRACTING THE ATTENTION OF DRIVERS WHEN DRIVING AT PEDESTRIAN CROSSINGS

The responsible attitude of all road users towards each other is an important element in the use of public roads. Pedestrian crossings are considered to be one of the places where most accidents happen. This paper examines the process of functioning of plastic pedestrian mannequins, which began to be massively installed by the authorities on the roads of various cities. In the course of the research, several basic provisions regarding the effectiveness of their use were established. The first of the provisions is interpreted as increasing the attention of drivers when approaching a pedestrian crossing, but this happens only within 2–4 weeks after the installation of mannequins. Then, experienced drivers do not pay attention to them. The second provision establishes the limitation of visibility by drivers of real pedestrians, who quite often are behind plastic mannequins waiting for a free roadway. The third provision describes the negative impact on drivers due to the creation of stressful situations when inspecting the roadway on the move, braking, and then accelerating the vehicle again without the need for that in the form of plastic pedestrians who do not move anywhere. All studies were carried

out in real time with confirmation by photo fixation, and a graph and diagram of violations of traffic rules by drivers when moving through a pedestrian crossing was constructed. As a result, it was established that the effectiveness of the functioning of plastic pedestrian mannequins is manifested precisely within 2–4 weeks after their installation on the roadway. Over time, accustomed drivers who follow the same or similar routes stop paying attention to the available safety elements, which are installed to attract the attention of drivers. This applies to drivers of passenger cars and trucks, taxis and buses, as well as utility vehicles.

Key words: *driver, pedestrian, road users, pedestrian crossing, plastic pedestrian dummy, road signs, traffic rules, safety, quality.*

Постановка проблеми

Покращення умов функціонування пішохідних переходів є важливим завданням для відповідних правих органів, а також органів державної та місцевої влади. Важливість даного питання не може бути суперечливою з точки зору безпеки для пішоходів, що рухаються при перетині проїзної частини.

Організація проїзду по пішохідному переходу, в переважній більшості випадків, регулюється попереджувальним знаком «Пішохідний перехід». Згідно з діючими Правилами дорожнього руху, даним знаком відбувається попередження про наближення до нерегульованого пішохідного переходу, позначеного відповідними дорожніми знаками або дорожньою розміткою. Такий знак встановлюється поза населеними пунктами на відстані, що складає 150–300 м, а у населених пунктах — на відстані 50–100 м до початку небезпечної ділянки. Якщо виникає необхідність, знак встановлюють і на іншій відстані, що зазначається на табличці [1]. Також, згідно з інформаційно-вказівними знаками, наявні знаки «Пішохідний перехід» відбувається позначення місць, що є призначеними для організованого переходу пішоходів через проїзну частину. Знаки встановлюється праворуч або ліворуч від дороги на ближній межі переходу [2].

Однак, значні порушення Правил дорожнього руху в певній мірі стосуються порушень при русі водіями через пішохідні переходи. Загострення уваги водія при русі на відносно рівному проміжку дороги без пішохідних переходів значно якісніше відображається при обгонах або збільшенні швидкості, а ніж при перетині пішохідного переходу. З метою покращення умов функціонування пішохідних переходів та привертання уваги водіїв при під'їзді до них значного поширення набуло встановлення пластикових пішоходів манекенів з одного або навіть обох боків пішохідного переходу. Тому, постає актуальне питання щодо якості функціонування нововведень на проїзній частині та ефективності їх використання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Застосування моделей в теорії екстремальних значень, які сприяють проактивному управлінню безпекою для пішоходів, набуває популярності завдяки екстраполяційним можливостям в оцінці аварій за їх попередниками (тобто конфліктами) [3]. В роботі [4] результатами наголошено на важливості підходів, заснованих на даних щодо безпеки пішоходів з одночасним спонуканням транспортні агенції впроваджувати цільові і ефективні стратегії з безпеки. В майбутньому інтеграція по штучному інтелекту до системи з управління дорожнім рухом і безпеки могла б значно підвищити рівень безпеки для пішохода.

Останні тенденції для міського дизайну закликають до рівносильного ставлення до усіх учасників дорожнього руху і призводять до переходу з традиційної концепції по сегрегації до більшої інтеграції. Зазвичай, це призводило до зручніших у пішоходів планувань із ширшими тротуарами, меншою кількістю захисних огорож й нижчими (або навіть відсутніми) бордюрами [5]. Дане дослідження є одним із влучних прикладів аналізу встановлення пластикових пішоходів манекенів на пішохідних переходах для нашого дослідження. Пов'язано це з аналізом впливу особливих умов не так на водіїв (що розглядаємо ми), як на пішоходів. Тому, результати дослідження [5] показують, що додатковий простір і зменшення скупчень людей після реконструкції призводять до того, що пішоходи ідуть менш квапливо і наближаються до бажаної швидкості, тоді як більш дружні умови, що створені плануванням вулиці або дорожні елементи, підвищують їхню впевненість при виході на проїжджу частину та переході.

Очевидно, що безпечна мобільність в пішоходів має вирішальне значення для транспортної системи. Технології можуть допомогти скоротити кількість зіткнень транспортних засобів із пішоходами [6-7]. Тому, в продовження ідеї роботи [5] доцільно підкреслити думку дослідження [8], де указано, що є необхідність в розробці стандартизованих стратегій, за рахунок яких можна дослідити ефективність і застосовність готових до ринку систем безпеки і допомоги пішоходам, що різняться за своєю реалізацією та технологією датчиків.

Різниця в моделях для поведінки, пов'язаної з типом перехрестя і рівнем захисту, показує, що контекст може опосередковуватися рівнем переговорів між водіями і пішоходами. Ці результати інформують щодо того, як контекст й взаємодія водія та пішохода мають бути включеними до майбутніх зусиль із моделювання, які, зрештою, можуть підтримати проектування автоматизованих систем, що здатні взаємодіяти безпечніше, ефективно та соціально [9].

За останнє десятиліття підвищення безпеки дорожнього руху привернуло дедалі більшу увагу в зв'язку з реалізацією розумних доріг та впровадженням автономних транспортних засобів. Інтелектуальні транспортні системи, як один із основних компонентів парадигми розумних міст, допомагають підвищити безпеку водіїв, знизити ймовірність зіткнень транспортних засобів та покращити досвід мандрівників. Проте пішохід, як один із

уразливих учасників дорожнього руху та основний постраждалий у дорожньо-транспортних пригодах, відіграє важливу роль [10]. Очевидно, що пристрої для заспокоєння руху знижують швидкість транспортних засобів та, таким чином, частоту та тяжкість травм пішоходів у забудованих районах міст. Однак той факт, що вони розміщені на магістральних дорогах, дедалі частіше стає проблемою безпеки дорожнього руху [11].

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є проведення аналізу ефективності функціонування пішоходів манекенів встановлених на пішохідних переходах з метою привертання уваги водіїв при під'їзді та перетині пішохідних переходів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Ефективність функціонування встановлених пішоходів має визначатися покращеним рівнем уваги водія транспортного засобу при русі до пішохідного переходу. Цим визначається зупинка руху транспортного засобу у разі появи пішоходів. У зв'язку зі встановленими манекенами пішоходів досить активних суперечок набувають твердження щодо як покращення, так і погіршення ситуацій при русі через пішохідні переходи. Першим з варіантів підкреслено значне покращення з точки зору звертання уваги на наявних пішоходів. Проте, слід підкреслити, що таке явище спостерігалося перший проміжок часу, який можна виокремити як 2–4 тижні після встановлення. Особливо це стосується руху водіїв по одному й тому ж самому маршруту. Тобто, без зміни локації та через одні і ті ж самі пішохідні переходи. Зрозумілим є явище звикання указаних водіїв, що здійснюють рух за подібними маршрутами, до наявності манекенів пішоходів, тобто пішоходів як таких, що не здійснюють рух через проїзну частину, зокрема через пішохідний перехід. Тому, перевірка ефективності функціонування таких нововведень є важливим елементом в визначенні якості роботи окремих елементів проїзної частини.

З метою проведення експериментального дослідження взято за основу рух транспортних засобів через пішохідний перехід міста Ромни Сумської області через головну дорогу поруч з поворотом на об'їзну дорогу міста Ромни для вантажних транспортних засобів (рис. 1 та рис. 2).



Рис. 1. Обраний проміжок ділянки руху для експериментального дослідження

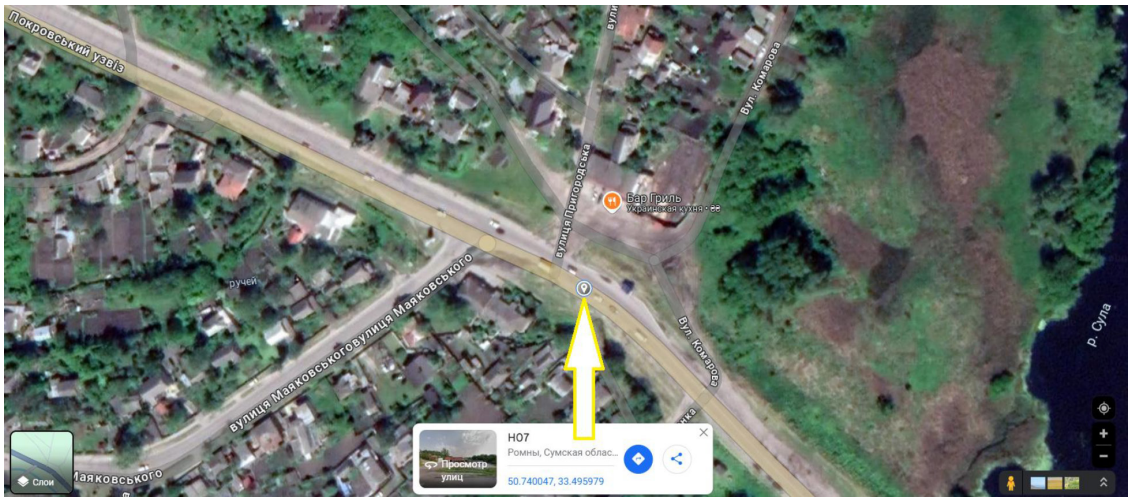


Рис. 2. Локація пішохідного переходу

Методикою проведення експерименту визначено спостереження за реакцією водіїв при русі через указаний пішохідний перехід та зупинкою транспортних засобів при їх появі. Потім, кілька разове повторне спостереження з метою отримання статистичних даних щодо ефективності функціонування пластикових пішоходів манекенів.

В ході першого експериментального дослідження встановлено, що протягом двох хвилин перебування пішохода на переході жоден з транспортних засобів не здійснив зупинку. З незрозумілих причин, таку поведінку довелося з спостерігати як по відношенню до легкових автомобілів, так і по відношенню до вантажних транспортних засобів – автопоїздів, так і автобусів, що рухаються за визначеним маршрутом впродовж усього проміжку часу. Нижче, на рис. 3 та 4 зображено послідовність руху транспортних засобів через пішохідний перехід з порушенням правил дорожнього руху по причині не пропускання пішоходів. Також, слід обов'язково підкреслити наявність одразу



Рис. 3. Явище порушення правил дорожнього руху водіями транспортних засобів



Рис. 4. Умови проходження пішохідного переходу пішоходом

двох інформаційно-вказівних знаків «Пішохідний перехід» з обох сторін руху проїзної частини. В такий спосіб, встановлено, що відбувається не лише ігнорування знаків дорожнього руху, а і порівняно низький рівень ефективності функціонування пластикових пішоходів манекенів, встановлених з обох сторін пішохідного переходу.

Аналогічно до представленого першого експерименту, поведінка водіїв транспортних засобів залишилася незмінною. Тому, доцільним є зображення статистики порушення правил дорожнього руху водіями при переїзді через пішохідні переходи в кількісному співвідношенні авто, що порушили правила по відношенню до кожного з пішоходів (рис. 5).

Таким чином, виходячи з даних, отриманих внаслідок проведення експерименту, стає очевидним стандартне недотримання водіями правил дорожнього руху при переїзді через пішохідні переходи. Внаслідок отриманих

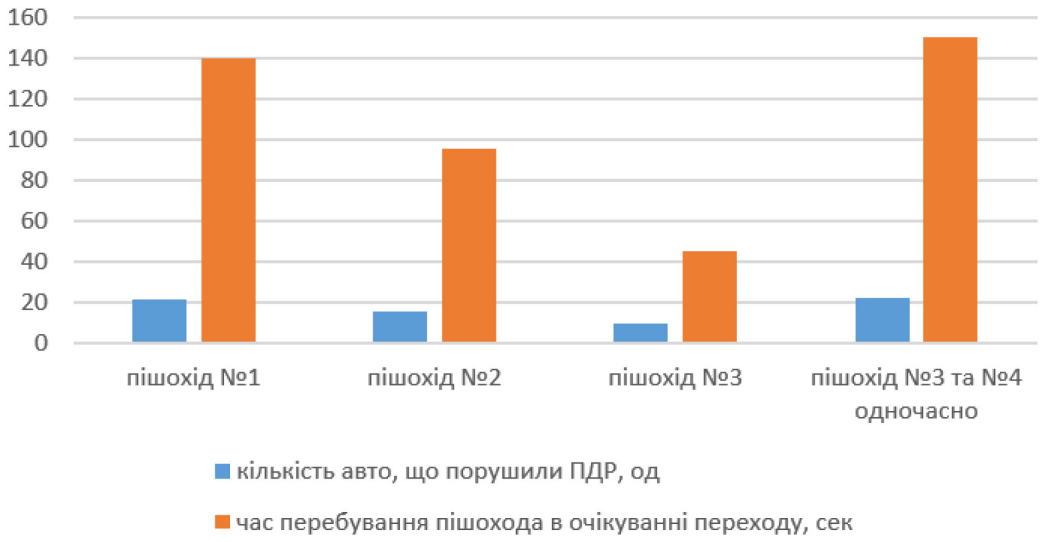


Рис. 5. Діаграма порушення водіями ПДР при переїзді через пішохідний перехід

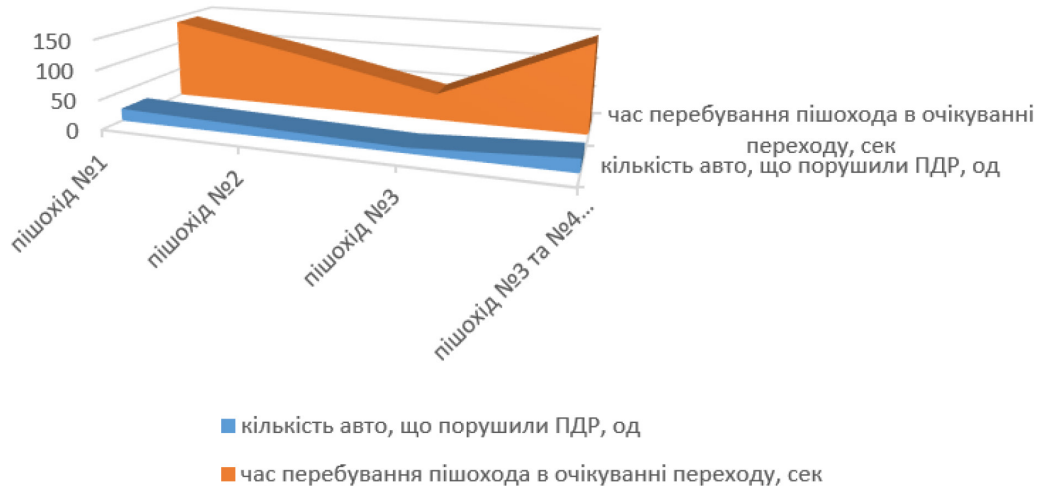


Рис. 6. Об'ємний графік порушення водіями ПДР при переїзді через пішохідний перехід

даних, а також за результатами опитування окремих водіїв, що не приймали участі в проведенні експерименту, встановлено дві головні думки щодо функціонування пластикових манекенів пішоходів.

Перша думка полягає в створенні безпричинних стресових ситуацій для водіїв, що під'їжджають до пішохідного переходу та реагують на встановлені манекени пішоходів, а живого пішоходу немає. Також, водіями підкреслено витрату часу та ресурсу автомобіля на процес гальмування, а потім його розгону без необхідності.

Друга думка полягає в значному зменшенні оглядовості проїжджої частини для водія внаслідок встановлення таких манекенів пішоходів. Водії, що рухаються за звичними для себе маршрутами та через одні і ті ж самі пішохідні переходи, не лише ігнорують пластикового манекену, а і за ним в половині випадків не помічають живого пішохода, який має наміри перейти пішохідний перехід. Такий пішохід є закритим та невидимим для водія за пластиковим манекеном пішохода.

Висновки

Покращення якості дорожньої обстановки завжди зводиться, перш за все, до покращення безпеки для людини, а потім її комфорту. Внаслідок проведеного експерименту встановлено, що додаткові пластикові манекени пішоходів на пішохідних переходах мають свої переваги та недоліки. Як показали статистичні дані, безпека для пішохода майже не підвищилася, а ігнорування правил дорожнього руху водіями зросло.

Список використаної літератури

1. Заборонні знаки. Електронний ресурс. URL: https://vodiy.ua/znaky/3/
2. Інформаційно-вказівні знаки. Електронний ресурс. URL: https://vodiy.ua/znaky/5/

3. Ankunda, A., Ali, Y., & Mohanty, M. (2024). Pedestrian crash risk analysis using extreme value models: New insights and evidence. Accident; analysis and prevention, 203, 107633. https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107633

4. Ahsan, M. J., Abdel-Aty, M., & Anwari, N. (2024). Vehicle-Pedestrian near miss analysis at signalized mid-block crossings. Journal of Safety Research. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.08.006

5. Kaparias, I., & Tsonev, I. (2023). Pedestrian behaviour in integrated street designs: A mesoscopic analysis. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.10.015

6. Mahdinia, I., Khattak, A. J., & Mohsena Haque, A. (2022). How effective are pedestrian crash prevention systems in improving pedestrian safety? Harnessing large-scale experimental data. Accident; analysis and prevention, 171, 106669. https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106669

7. Ke, Y., & Gkritza, K. (2019). Safety ramifications of a change in pedestrian crosswalk law: A case study of Oregon, USA. International Journal of Transportation Science and Technology. https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.07.004

8. Jannat, M., Roldan, S. M., Balk, S. A., & Timpone, K. (2020). Assessing potential safety benefits of advanced pedestrian technologies through a Pedestrian Technology Test Bed. Journal of Intelligent Transportation Systems, 25, 139–156. https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1807347

9. Noonan, T. Z., Gershon, P., Domeyer, J. E., Mehler, B., & Reimer, B. (2022). Interdependence of driver and pedestrian behavior in naturalistic roadway negotiations. Traffic Injury Prevention, 23, S62–S67. https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2108023

10. Hamdani, S. E., Benamar, N., & Younis, M. F. (2020). Pedestrian Support in Intelligent Transportation Systems: Challenges, Solutions and Open issues. Transportation Research Part C-emerging Technologies, 121, 102856. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102856

11. Damsere-Derry, J., Ebel, B. E., Mock, C. N., Afukaar, F. K., Donkor, P., & Kalowole, T. O. (2019). Evaluation of the effectiveness of traffic calming measures on vehicle speeds and pedestrian injury severity in Ghana. Traffic Injury Prevention, 20, 336–342. https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1581925

References

1. Prohibition signs. Electronic resource. URL: https://vodiy.ua/znaky/3/

2. Informational and indicative signs. Electronic resource. URL: https://vodiy.ua/znaky/5/

3. Ankunda, A., Ali, Y., & Mohanty, M. (2024). Pedestrian crash risk analysis using extreme value models: New insights and evidence. Accident; analysis and prevention, 203, 107633. https://doi.org/10.1016/j.aap.2024.107633

4. Ahsan, M. J., Abdel-Aty, M., & Anwari, N. (2024). Vehicle-Pedestrian near miss analysis at signalized mid-block crossings. Journal of Safety Research. https://doi.org/10.1016/j.jsr.2024.08.006

5. Kaparias, I., & Tsonev, I. (2023). Pedestrian behaviour in integrated street designs: A mesoscopic analysis. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. https://doi.org/10.1016/j.trf.2023.10.015

6. Mahdinia, I., Khattak, A. J., & Mohsena Haque, A. (2022). How effective are pedestrian crash prevention systems in improving pedestrian safety? Harnessing large-scale experimental data. Accident; analysis and prevention, 171, 106669. https://doi.org/10.1016/j.aap.2022.106669

7. Ke, Y., & Gkritza, K. (2019). Safety ramifications of a change in pedestrian crosswalk law: A case study of Oregon, USA. International Journal of Transportation Science and Technology. https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2018.07.004

8. Jannat, M., Roldan, S. M., Balk, S. A., & Timpone, K. (2020). Assessing potential safety benefits of advanced pedestrian technologies through a Pedestrian Technology Test Bed. Journal of Intelligent Transportation Systems, 25, 139–156. https://doi.org/10.1080/15472450.2020.1807347

9. Noonan, T. Z., Gershon, P., Domeyer, J. E., Mehler, B., & Reimer, B. (2022). Interdependence of driver and pedestrian behavior in naturalistic roadway negotiations. Traffic Injury Prevention, 23, S62–S67. https://doi.org/10.1080/15389588.2022.2108023

10. Hamdani, S. E., Benamar, N., & Younis, M. F. (2020). Pedestrian Support in Intelligent Transportation Systems: Challenges, Solutions and Open issues. Transportation Research Part C-emerging Technologies, 121, 102856. https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102856

11. Damsere-Derry, J., Ebel, B. E., Mock, C. N., Afukaar, F. K., Donkor, P., & Kalowole, T. O. (2019). Evaluation of the effectiveness of traffic calming measures on vehicle speeds and pedestrian injury severity in Ghana. Traffic Injury Prevention, 20, 336–342. https://doi.org/10.1080/15389588.2019.1581925

ТЕХНОЛОГІЯ ЛЕГКОЇ ТА ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 004.42 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.41

А. П. БОЙКО
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерної інженерії
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
ORCID: 0000-0002-3449-0453

М. В. ШУМАКОВ
магістр спеціальності інженерія програмного забезпечення
Чорноморський національний університет імені Петра Могили
ORCID: 0009-0000-7142-5741

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИМУЛЮВАННЯ ПОЛЬОТУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

У статті проаналізовано особливості створення програмного забезпечення для симулювання польоту безпілотних літальних апаратів. Дане програмне забезпечення є корисним інструментом для навчання пілотів та тестування безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у безпечному та контрольованому середовищі, що є надзвичайно важливим у сучасних умовах. Воно забезпечує реалістичний досвід польоту та дозволяє користувачам покращувати свої навички управління дронами без реального ризику.

Під час роботи було досліджено існуючі підходи до проєктування; проаналізовано ринок безпілотних літальних апаратів та їх функціональні можливості; вивченно технічні характеристики; досліджено стандарти безпеки та контролери управління БПЛА, що дозволило належним чином розробити та імплементувати симуляцію польоту БПЛА з допомогою рушія Unreal Engine 5. У статті наведено основні функціональні можливості та області використання застосунку. Розроблено інтерфейс, який надає можливість користувачу обирати завдання та локацію для польоту, змінювати налаштування БПЛА, передивлятися фото та відео, які були записані при попередніх польотах. При симуляції руху БПЛА запропоновано керування методом PID Controller, що дозволяє керувати системою з метою підтримки заданого рівняння стану або забезпечення бажаного вихідного сигналу.

В результаті виконаних досліджень розроблено програмне забезпечення симуляції політів БПЛА з використанням Unreal Engine 5, яке призначено для навчання та тренування пілотів БПЛА без витрат на матеріальну складову, а також для дослідження технічних можливостей пристрою. Програмне забезпечення, що розроблено, може бути використано для: навчання пілотування БПЛА; вдосконалення навичок досвідчених пілотів; виконання віртуальних місій та завдань; експериментування з налаштуваннями дронів тощо. Може використовуватися для рішення як військових так і цивільних задач.

Ключові слова: *програмне забезпечення, симулювання польоту, БПЛА, віртуальне середовище, Unreal Engine 5, тестування, інтерфейс, керування.*

A. P. BOIKO
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University
ORCID: 0000-0002-3449-0453

M. V. SHUMAKOV
Master's Degree in Software Engineering
Petro Mohyla Black Sea National University
ORCID: 0009-0000-7142-5741

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR SIMULATING THE FLIGHT OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

The article analyses the peculiarities of creating software for simulating the flight of unmanned aerial vehicles. This software is a useful tool for training pilots and testing unmanned aerial vehicles (UAVs) in a safe and controlled environment, which is extremely important in current conditions. It provides a realistic flight experience and allows users to improve their drone control skills without any real risk.

During the work, existing design approaches were investigated; the market for unmanned aerial vehicles and their functionality was analysed; technical specifications were studied; safety standards and UAVs controllers were investigated, which allowed to develop and implement UAVs flight simulation using the Unreal Engine 5 properly.

The article presents the main functionalities and areas of application use. The interface that allows the user to select a task and A location for the flight, change the UAVs settings, view photos and videos recorded during previous flights was considered.

When simulating the UAVs movement, the PID Controller method is proposed, which allows controlling the system in order to maintain the given equation of state or provide the desired output signal.

As a result of the research, the UAVs flight simulation software using Unreal Engine 5 was developed, which is designed to educate and train UAV pilots without the cost of material components, as well as to study the technical capabilities of the device. The developed software can be used to: teach drone piloting; improve the skills of experienced pilots; perform virtual missions and tasks; experiment with drone settings, etc. It can be used to solve both military and civilian tasks.

Key words: *software, flight simulation, UAVs, virtual environment, Unreal Engine 5, testing, interface, control.*

Постановка проблеми

Безпілотні літальні апарати (БПЛА) – це клас роботизованих апаратів, які можуть нести корисне навантаження і виконувати польотні місії керуючись або станціями дистанційного керування, або автономно. БПЛА дуже мобільні, що дозволяє їм функціонувати навіть у віддалених районах, де відсутня дорожня або технологічна інфраструктура. Зростання популярності БПЛА у різних галузях [1, 2], таких як фото та відео зйомка, моніторинг, інспекція, рятівні операції, транспортування вантажів та сільське господарство, ставить питання навчання володіння навичками пілотування БПЛА. Однією з галузей застосування БПЛА є військове використання, де вони можуть використовуватись для збору розвідувальної інформації, пошуку та знищення цілей на ворожій території [3]. Але навчання пілотів БПЛА у реальних умовах є вартісною та трудомісткою задачею. Вирішити цю проблему може використання віртуальних симуляторів польоту БПЛА, які мають налаштування наближні до реальних.

Симулятор дозволить створити реалістичне середовище для навчання та досліджень, що підвищить якість підготовки пілотів та сприятиме безпечному використанню БПЛА. Програмний застосунок може допомогти у відпрацюванні різноманітних сценаріїв польотів та тестуванні нових алгоритмів керування БПЛА, що сприяє розвитку цієї галузі та навчанню аматорів пілотування БПЛА. Також симулятор на базі Unreal Engine може бути корисним для навчання військових пілотів БПЛА та для проведення військових досліджень.

Актуальність теми полягає в тому, що навчання операторів БПЛА потребує спеціальних методик та інформаційних технологій, що забезпечують засвоєння необхідних знань та навичок з управління БПЛА, а також оцінку їх успішності та результативності. Розробка нових методик, використання віртуальної реальності та інших сучасних технологій можуть значно покращити якість навчання та результати операторів БПЛА.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Сьогодні розробки та впровадження різноманітного програмного та апаратного забезпечення для навчання пілотів безпілотних літальних апаратів перебувають у фокусі уваги багатьох вітчизняних [3, 5] і закордонних дослідників [1, 2, 5, 6, 7] та практиків у галузі інформаційних технологій.

Формулювання мети дослідження

Мета даної роботи полягає у дослідженні методів і засобів розробки програмного забезпечення для симуляції польотів БПЛА у віртуальному середовищі Unreal Engine 5.

Викладення основного матеріалу дослідження

Пілотування безпілотними літальними апаратами за допомогою програмного забезпечення (ПЗ) означає використання спеціалізованих програм або застосунків для навчання пілотуванню БПЛА. Ці програми дозволяють користувачам вивчати основи керування дронами в безпечному віртуальному середовищі; відпрацьовувати маневри, реагувати на різні ситуації та оцінювати свої дії без ризику пошкодження дрону або навколишнього середовища. Використання симулятора польоту дрону є корисним для початківців, а також досвідчених пілотів, що бажають вдосконалити свої навички та ознайомитися з новими моделями БПЛА.

Симулятори польоту БПЛА можуть мати різні рівні складності та налаштувань, що дозволяє адаптувати досвід пілотування під потреби користувача. Вони можуть включати в себе різноманітні місця для польотів, сценарії та завдання, а також інструменти для аналізу виконання завдань та покращення результатів.

Основні характеристики програмного забезпечення, що розроблюється:

– призначене для тренування та навчання пілотуванню БПЛА;
– користувачі повинні мати навички користування комп’ютерами та базові знання з пілотування БПЛА;
– основними складовими застосунку є симулятор польоту БПЛА, управління, візуалізація даних та інтерфейс користувача;
– працює на операційних системах Windows.

Доступні наступні сценарії використання програмного застосунку:

1. Навчання початківців пілотуванню БПЛА, засвоєння різних режимів польоту та виконанню маневрів.
2. Вдосконалення навичок досвідчених користувачів БПЛА.
3. Тестування моделей БПЛА з різними характеристиками та можливостями у віртуальному середовищі.
4. Виконання різноманітних віртуальних місій та завдань з використанням БПЛА, які симулюють реальні ситуації (наприклад, спостереження, фото та відео зйомка, рятувальні операції тощо).
5. Симуляція польотів БПЛА у різних погодних умовах (наприклад, сніг, туман, вітер, дощ, зміна температур та освітлення).
6. Вибір оптимальних налаштувань для реальних ситуацій шляхом проведення експериментів з різними конфігураціями БПЛА та їх параметрів (мотори, пропелери, камери, батареї тощо).

Головне меню, яке відображається при запуску програмного застосунку, зображено на рис. 1. В даному меню користувач може обрати тип завдання та локацію при натисканні на кнопку «Flight» (рис. 2). Також є можливість переглянути фото та відео, які були записані при попередніх польотах на БПЛА. У головному меню є можливість виконати налаштування ПЗ.



Рис. 1. Mockup головного меню

Після вибору локації, користувач переходить до основного режиму програмного застосунку, де може виконувати завдання або місії (рис. 2).



Рис. 2. Вибір локації для польоту

Після вибору локації, у меню «Settings» відображаються налаштування БПЛА у реальному часі (рис. 3). Користувач має змогу змінювати налаштування БПЛА, зберігати їх або повертатися до попередніх.

У розробці програмного застосунку для симуляції польоту БПЛА було використано такі технології, як: Blender, 3DS Max, GAEA, Adobe Substance Painter та засоби рушія Unreal Engine 5.

Розробка моделі БПЛА – це процес побудови візуальної та геометрично коректної моделі у 3D-середовищі. Цей процес складається з визначення основних вимог до моделі, створення базової геометрії, розгортання UV-текстур та текстурування, налагодження та оптимізацію.

В роботі було досліджено ряд існуючих моделей БПЛА, що дозволило ознайомитися зі специфікаціями та функціональними можливостями реальних пристроїв, вивчити їх особливості та принципи роботи [1, 5].



Рис. 3. Налаштування параметрів БПЛА

В процесі досліджень авторами було:

– Проаналізовано ринок БПЛА, вивчено різні моделі, виробники, їх функції та можливості.

– Розглянуто технічні характеристики БПЛА: вага, розміри, максимальна швидкість, дальність керування, час польоту, типи сенсорів та камер тощо.

– Проаналізовано функціональні можливості різних типів БПЛА: автопілот, стабілізація, GPS-навігація, зйомка відео та фотографій, виконання певних маневрів тощо.

– Опрацьовано стандарти безпеки, які застосовуються до БПЛА. Наприклад, правила використання у контрольованих зонах, обмеження висоти польоту тощо.

В результаті досліджень автори отримали інформацію стосовно характеристик, функцій та особливостей конструкції існуючих БПЛА, що дозволило розробити програмне забезпечення симуляції польоту БПЛА [6, 7] з використанням рушія Unreal Engine 5.

Авторами було створено основні елементи базової геометрії моделі БПЛА: корпус, пропелери, камера (рис. 4).

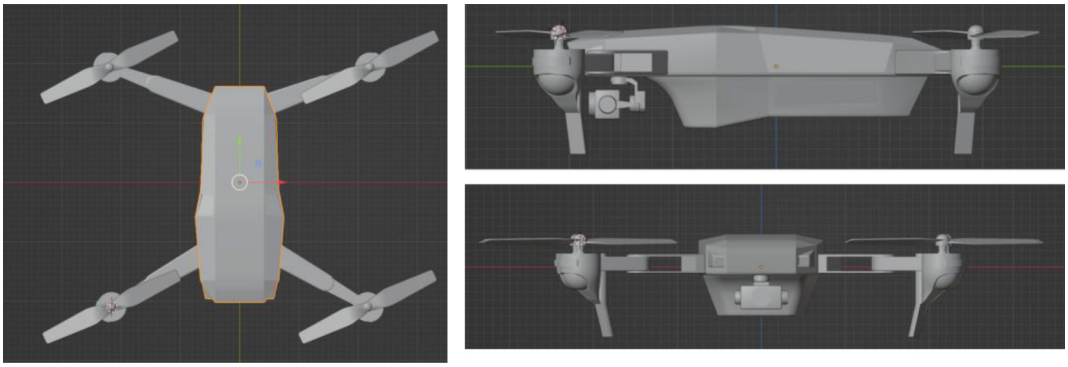


Рис. 4. Геометрія БПЛА

В результаті було розроблено трьохвимірну модель корпусу БПЛА, яка візуально відповідає реальній конструкції та має всі необхідні елементи для коректного функціонування при симуляції польоту (рис. 5).

Дослідження контролерів керуванняя БПЛА є важливою частиною процесу розробки середовища для симулювання польоту [4, 6, 7, 8]. У процесі дослідження контролерів керування БПЛА було розглянуто різні типи контролерів, їх функціональні можливості та способи взаємодії з симуляційним середовищем. В результаті, у даному програмному застосунку було використано PID Controller [9].

Використання PID Controller дозволяє керувати системою з метою підтримки заданого рівняння стану або забезпечення бажаного вихідного сигналу. PID Controller має три режими контролю: пропорційний, інтегральний та похідний. Кожен режим відповідає за певну частину керування процесом.

В роботі було проведено тестування програмного забезпечення на відповідність вимогам та специфікаціям при разних сценаріях використання ПЗ. Після цього, програмний застосунок може бути використаним для симуляції польоту БПЛА на основі Unreal Engine 5 (рис. 6).

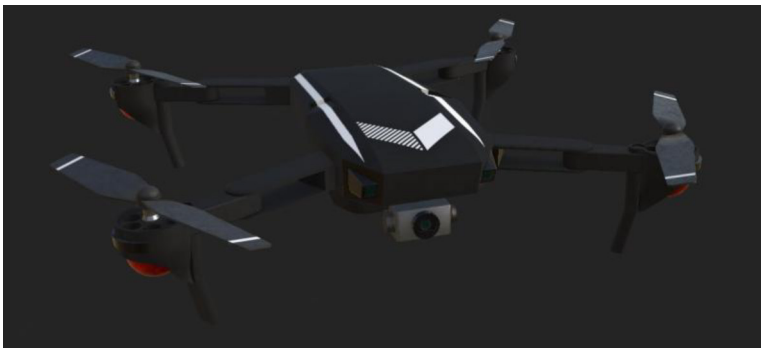


Рис. 5. 3D модель БПЛА

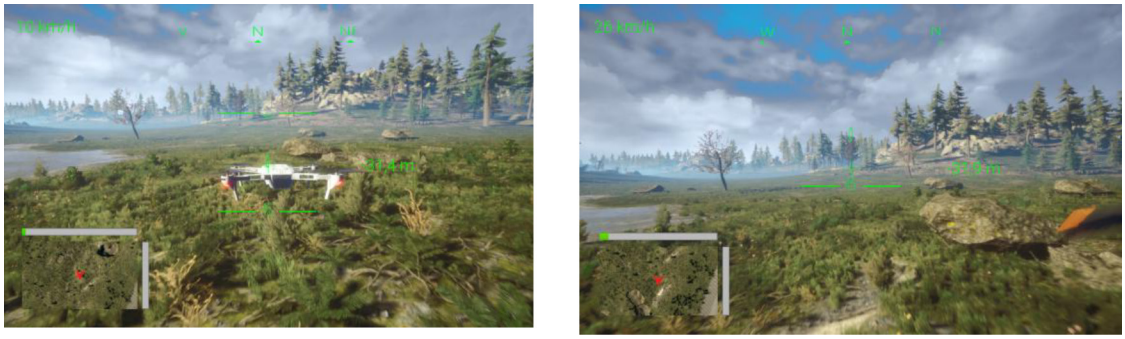


Рис. 6. Приклади симуляції польоту БПЛА

Висновки

Проведені дослідження показують, що симулювання польоту БПЛА є корисним інструментом для навчання та тестування безпілотних літальних апаратів у безпечному та контрольованому середовищі, що є надзвичайно важливим у сучасних умовах. Розроблене програмне забезпечення симуляції польоту БПЛА з використанням Unreal Engine 5 надає можливості налаштування умов польоту, характеристик БПЛА, реалістичних фізичних параметрів та середовища тощо. Дане програмне забезпечення може бути використано для навчання та тренування пілотів БПЛА, розвиток їх навичок та вдосконалення стратегій управління.

Список використаної літератури

1. Syed Agha Hassnain Mohsan, Nawaf Qasem Hamood Othman, Yanlong Li, Mohammed H. Alsharif, Muhammad Asghar Khan Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. Intelligent Service Robotics. 2023. P. 109–137. DOI: https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4

2. Selçuk Kaya, Zdobyslaw Goraj The Use of Drones in Agricultural Production. International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research. 2020. Vol. 4 (2). P. 166–176. DOI: https://doi.org/10.29329/ijiaar.2020.254.2

3. Глотов В. М., Фис М. М. та ін. Застосування БПЛА у військовій справі та аерозніманні. Монографія. Видавництво: Львівська політехніка, 2022. 196 с.

4. Кучеренко О. І., Вакалюк Т. А. Огляд технічних та програмних засобів керування БПЛА. ВІСНИК ХНТУ. Серія ІнформаційнІ технологІї. Херсон, 2024. № 2. С. 170–176. https://doi.org//10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24

5. Akshay Kumar. A Technical Overview of drones and their Autonomus Aplications. 25 Jun. 2020. URL https://control.com/technical-articles/a-technical-overview-of-drones-and-their-autonomous-applications/ (дата звернення: 21.01.2025)

6. Gokulraj KS, Manikandan J. Design and development of simulator software for formation flight of drones. Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC). 26–27 May 2021. DOI: https://doi.org/10.1109/ZINC52049.2021

7. Vanema Kangunde, Emmannuel K. Theophilus. A review on drones controlled in real-time. International Journal of Dynamics. 05 Jun. 2021. № 9. P. 1832–1846. DOI: https://doi.org/10.1007/s40435-020-00737-5

8. Yang Xiao,, Shulin Dai, Chenfan Xiao and Xinfeng Xu Research and Development of a Real-time UAV Flight Visualization Simulation System Journal of Physics: Conference Series 2022. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2218/1/012081/pdf

9. The PID Controller & Theory Explained. URL: https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html?srsltid=AfmBOopVmu_8plBzximhDFVuDhPJE_6OVXih-SGiN60UeRKFrYwjeHac (дата звернення: 21.01.2025).

References

1. Syed Agha Hassnain Mohsan, Nawaf Qasem Hamood Othman, Yanlong Li, Mohammed H. Alsharif, Muhammad Asghar Khan. (2023). Unmanned aerial vehicles (UAVs): practical aspects, applications, open challenges, security issues, and future trends. Intelligent Service Robotics, 109 – 137. DOI: https://doi.org/10.1007/s11370-022-00452-4 [in English].

2. Selçuk Kaya, Zdobyslaw Goraj. (2020). The Use of Drones in Agricultural Production. International Journal of Innovative Approaches in Agricultural Research, 4 (2), 166–176. DOI: https://doi.org/10.29329/ijiaar.2020.254.2 [in English].

3. Hlotov V. M., Fys M. M. ta in. (2022). Zastosuvannia BPLA u viiskovii spravi ta aeroznimanni [The application of UAVs in military affairs and aerial surveys]. Vydavnytstvo: Lvivska politekhnika [in Ukrainian].

4. Kucherenko O. I., Vakaliuk T. A. (2024). Ohliad tekhnichnykh ta prohramnykh zasobiv keruvannia BPLA [Overview of UAV control hardware and software]. VISNYK KhNTU. Seriia InformatsIinI tekhnolohIi. Kherson, (2), 170–176. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.2.24. [in Ukrainian].

5. Akshay Kumar. (2020). A Technical Overview of drones and their Autonomus Aplications. Retrieved from https://control.com/technical-articles/a-technical-overview-of-drones-and-their-autonomous-applications/ [in English].

6. Gokulraj KS, Manikandan J. Design and development of simulator software for formation flight of drones. (2021). Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC). DOI: https://doi.org/10.1109/ZINC52049.2021. [in English].

7. Vanema Kangunde, Emmannuel K. Theophilus. (2021). A review on drones controlled in real-time. International Journal of Dynamics, (9), 1832–1846. DOI: https://doi.org/10.1007/s40435-020-00737-5. [in English].

8. Yang Xiao, Shulin Dai, Chenfan Xiao and Xinfeng Xu. (2022). Research and Development of a Real-time UAV Flight Visualization Simulation System. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, (1–8). Retrieved from https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2218/1/012081/pdf. [in English].

9. The PID Controller & Theory Explained. Retrieved from https://www.ni.com/en/shop/labview/pid-theory-explained.html?srsltid=AfmBOopVmu_8plBzximhDFVuDhPJE_6OVXih-SGiN60UeRKFrYwjeHac. [in English].

УДК 675.026.22:66.011 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.42

А. Г. ДАНИЛКОВИЧ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри біотехнології, шкіри та хутра
Київський національний університет технологій та дизайну
ORCID: 0000-0002-5707-0419

О. О. РОМАНЮК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри автомобільного транспорту та сучасної інженерії
Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»
ORCID: 0000-0001-9774-9875

Н. В. МЕРЕЖКО
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри товарознавства та митної справи
Державний торговельно-економічний університет
ORCID: 0000-0003-3077-9636

СТРУКТУРУВАННЯ ШКІРЯНОГО НАПІВФАБРИКАТУ, ОТРИМАНОГО З КІНСЬКОЇ СТРОВИНИ

Метою роботи є дослідження впливу електрохімічно активованої води на переддубильні та дубильні процеси формування шкіряного напівфабрикату з шкур коней. У роботі використано золений напівфабрикат – голину з сировини коней у виді половинок масою 6,7 кг, отриманих за розробленою і контрольною технологіями. Особливостями шкур коней і отриманого напівфабрикату є значна різниця товщин різних топографічних ділянок, що відрізняються у 3,6 рази.

Розроблена технологія процесів знезолювання-м'якшення, пікелювання, дублення та додублювання при формуванні еластичної шкіри з кінської сировини з використанням розчинів реагентів на електрохімічно активованій воді. Така технологія відрізняється від відомих одночасним обробленням всіх топографічних ділянок шкури коня. Показано ефективне використання католіту в процесах знезолювання-м'якшення шкіряного напівфабрикату, аноліту при пікелюванні і суміші аноліту з католітом на стадіях дублення. Встановлено зменшення витрат хлориду натрію і сірчаної кислоти при пікелюванні голини у два рази та скорочення процесу в 1,7 рази порівняно з діючою технологією. Водночас зменшено витрати сполук хрому на 20 % і 33 % відповідно при дубленні та додублюванні напівфабрикату. Отримана еластична шкіра переважає контрольний зразок як за кількістю хімічно зв'язаних реагентів з колагеном напівфабрикату при менших їх витратах, так і за комплексом фізико-хімічних показників. Шкіра, отримана за розробленою технологією відповідає вимогам ДСТУ 3115-95 «Шкіра для швейних виробів. Загальні технічні вимоги». Розроблену технологію формування еластичної шкіри з кінської сировини з використання розчинів реагентів на хімічно активованій воді можна віднести до масоощадних і екологічно орієнтованих.

Ключові слова: *напівфабрикат конини, електрохімічно активована вода, переддубильні та дубильні процеси, технологія дублення, фізико-хімічні властивості шкіри.*

A. G. DANYLKOVYCH
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Biotechnology, Leather and Fur
Kyiv National University of Technologies and Design
ORCID: 0000-0002-5707-0419

O. O. ROMANIUK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Motor Transport and Modern Engineering
Open International University of Human Development "Ukraine"
ORCID: 0000-0001-9774-9875

N. V. MEREZHKO
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Commodity Science and Customs Affairs
State University of Trade and Economics
ORCID: 0000-0003-3077-9636

STRUCTURING OF LEATHER SEMI-FINISHED PRODUCTS OBTAINED FROM HORSE FOOT

The aim of the work is to study the influence of electrochemically activated water on the pre-tanning and tanning processes of forming a leather semi-finished product from horse hides. The work used an ash semi-finished product – raw horse hide in the form of halves weighing 6,7 kg, obtained using the developed and control technologies. The features of horse hides and the resulting semi-finished product are a significant difference in the thickness of different topographical areas, which differ by 3,6 times.

The technology of the processes of de-ashing-softening, pickling, tanning and re-tanning in the formation of elastic leather from horse raw materials using reagent solutions in electrochemically activated water has been developed. This technology differs from the known ones by the simultaneous treatment of all topographic areas of the horse hide. The effective use of catholyte in the processes of de-ashing-softening of a leather semi-finished product, anolyte during pickling and a mixture of anolyte with catholyte at the tanning stages has been shown. It has been established that the consumption of sodium chloride and sulfuric acid during pickling of hides has been reduced by two times and the process has been shortened by 1,7 times compared to the current technology. At the same time, the consumption of chromium compounds has been reduced by 20 % and 33 %, respectively, during tanning and re-tanning of the semi-finished product. The obtained elastic leather is superior to the control sample both in terms of the number of chemically bound reagents with collagen of the semi-finished product at lower costs, and in terms of a set of physicochemical indicators. The leather obtained using the developed technology meets the requirements of DSTU 3115-95 "Leather for sewing products. General technical requirements". The developed technology for forming elastic leather from horse raw materials using reagent solutions in chemically activated water can be attributed to mass-saving and environmentally friendly.

Key words: *semi-finished horsemeat, electrochemically activated water, pre-tanning and tanning processes, tanning technology, physicochemical properties of leather.*

Постановка проблеми

При розробленні інноваційних та удосконаленні існуючих технологій виробництва шкірних матеріалів виникає необхідність врахування особливостей їх окремих стадій. У цьому відношенні особливу роль відіграють процеси підготовки напівфабрикату до дублення на стадіях знезолювання-м'якшення, пікелювання та інші оброблення. При врахуванні недоліків підготовчо-дубильних процесів приймається до уваги ефективність хімічних реагентів та їх екологічна безпечність. На кожній стадії формування шкіряного матеріалу використовується їх широкий асортимент хімічних реагентів специфічної дії з певним комплексом структурних і хімічних властивостей.

У зв'язку з цим особливе значення можуть мати специфічні властивості середовища, у якому перебігають технологічні процеси перетворення шкіряного напівфабрикату в готовий матеріал. Це може стосуватись електрохімічно активованого водного середовища, в якому, декластеризована вода набуває специфічних аномальних властивостей завдяки наявності вільних радикалів і йонів [1] може відбуватись прискорення технологічних процесів. При цьому завдяки більш ефективному проведенню переддубильно-дубильних процесів можна передбачити раціональне використання хімічних реагентів, у тому числі й небезпечних, а саме, в першу чергу, дубильних і підвищити екологічну безпечність таких технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У процесах формування шкіряних матеріалів особливе значення мають структурні перетворення колагену дерми на стадії переддубильно-дубильних оброблень шкіряного напівфабрикату. При цьому використовується широкий асортимент хімічних реагентів і матеріалів природного і синтетичного походження з утворенням стійких продуктів взаємодії. Аналіз переддубильно-дубильних процесів виробництва шкіри хромового дублення свідчить про наявність у відпрацьованих розчинах значної кількості мінеральних сполук – солей хрому, хлоридів, сульфатів [2]. Це може бути обумовлено використанням у підготовчих процесах до дублення хлориду натрію, сірчаної кислоти, сульфату амонію [3]. Автори [4] досліджували вплив буферної композиції – глюконат натрію, лимонна кислота і сульфат амонію на процес знезолювання шкіряного напівфабрикату. Встановлено ефективне видалення кальцію з структури напівфабрикату при його знезолюванні. Водночас у відпрацьованому розчині знижується вміст амонію і загального азоту на 86,0 і 79,0 % відповідно. У роботі [5] автори рекомендують замість кислотно-сольового оброблення напівфабрикату використовувати полімерні композиції, що включають малеїнову та акрилову кислоти. Це забезпечує рівномірний розподіл дубильних сполук у напівфабрикаті, зменшує їх витрати та скорочує тривалість технологічного процесу. Така технологія дає можливість знизити концентрацію хлоридів і сульфатів у стічних водах і тим самим підвищити екологічність технології.

Авторами [6] досліджено вплив протеолітичних ензимів у кислому середовищі на процес дублення напівфабрикату, властивості та його структуру. Такий напівфабрикат містив більше сполук хрому, він мав вищу гідротермічну стійкість, барвники глибше дифундували у його об'єм. Це стосується також жирових речовин. Разом з тим отримана шкіра характеризувалась нижчою міцністю і вищим розривним подовженням. Наведені результати дослідження заміни знезолювання-м'якшення голини сульфатом амонію і трипсином та пікелювання з високим вмістом хлориду натрію на безсольові оброблення з використанням відповідно кислої протеази L80A нафталінсульфонової кислоти [7]. Така інтегральна технологія без аміачного і безсольового оброблення напівфабрикату

дає можливість підвищити ефективність використання сполук хрому з 80 % до 95 %. При цьому у відпрацьованих розчинах вміст сполук хрому зменшується на 74 %, що дає можливість легко утилізувати стічні води.

Автори [8] рекомендують для удосконалення хромового дублення при пікелюванні використовувати полідисперсний карбоксилвмісний полімер. Встановлено ефективне поглинання сполук хрому з робочого розчину при використанні розгалужених молекул полімеру масою до 2 кДа завдяки утворенню додаткових хімічних зв'язків між полімером і колагеном напівфабрикату. Водночас при зменшенні витрат дубителя у 2,7 рази гідротермічна стійкість Wet Blue практично не змінюється і є вищою за 100 °С при витраті 1,5 % полімеру від маси золеного напівфабрикату. Авторами [9] досліджено застосування мікробіологічної трансглутамінази на стадії дублення напівфабрикату. Встановлено, що застосування цього препарату перед дубленням в кількості 0,6 % при витраті основних сполук хрому (ІІІ) до 4 % маси золеного напівфабрикату гідротермічна стійкість становить понад 100 °С. Авторами [10] використані наноемульсії акрилових кополімерів – метилметакрилат і бутилакрилат для попереднього дублення напівфабрикату сполуками хрому після пікелювання. При цьому підвищується гідротермічна стійкість напівфабрикату та його фізико-механічні властивості. Структурні зміни отриманих зразків шкіри підтверджені скануючою електронною мікроскопією. У роботах [11, 12] автори дослідили заміну пікелювання напівфабрикату обробкою полімером на основі малеїнової кислоти перед титановим дубленням. При цьому для запобігання бубняви використали хлорид натрію. Встановлено, що такий варіант титанового дублення напівфабрикату забезпечує отриманні Wet White для шкіри з комплексом високих фізико-механічних і гігієнічних властивостей. При цьому отримано зменшення вмісту сполук титану, хлоридів, сульфатів у відпрацьованому розчині відповідно у 2,0, 1,2 і 3,0 рази порівняно з діючою технологією.

Серед ефективних технологічних реагентів використана електрохімічно активована вода при переробленні рослинної сировини, що включає пептозани як високомолекулярні колоїдні полісахариди [13]. Це суттєво важливо для видалення глюкозаміноглюканів з поверхні колагенових фібрил в підготовчих процесах формування шкіри з використанням активованих водних розчинів. Автори [14] показали, що фракція води з високим pH – католіт і негативним окисно-відновним потенціалом ефективно проникає у клітини, звільнює білкову сировину від глобулярних білків, ліпідів та глюкозаміноглюканів. Авторами [15] встановлено пластифікаційний вплив католіту на структуру шкіряних матеріалів. Цей ефект появляється у підвищенні деформаційної здатності шкіри та зменшенні напружень при видаленні з неї вологи. Залежно від виду шкіри, її деформація може збільшуватись до 5 %. Використання аноліту [16, 17], завдяки його бактерицидним властивостям, дає можливість проводити технологічні процеси оброблення білкової сировини без застосування антисептиків.

Аналіз науково-технічної літератури свідчить про використання широкого асортименту хімічних реагентів і матеріалів у знезолювально-пікелювальних і дубильних процесах оброблення шкіряного напівфабрикату. При цьому особлива увага може бути приділена використанню активованій воді та її водним розчинам хімічних реагентів. Електрохімічно активована вода характеризується рядом переваг, що полягають у технології регулювання її фізико-хімічних властивостей, отримання окремих її фракцій із специфічними властивостями.

Формулювання мети дослідження

Мета роботи – дослідження впливу електрохімічно активованої води на переддубильні та дубильні процеси формування шкіряного напівфабрикату з шкур коней.

Викладення основного матеріалу дослідження

У роботі використано золений напівфабрикат – голину з сировини легкої конини у виді половинок масою 6,7 кг, отриманих за розробленою і контрольною технологіями [18]. Особливостями шкур коней і отриманого напівфабрикату є значна різниця товщин різних топографічних ділянок, що відрізняються у 3,6 рази.

Для подальших оброблень отриманого напівфабрикату технологічні розчини реагентів готували з використанням електрохімічно активованої (ЕХА) води – аноліту і католіту. Для отримання фракцій ЕХА води використано напіввиробничу установку проточного типу Ізумруд КФТО Національного університету харчових технологій потужністю 60–70 дм^3/год. При цьому аноліт і католіт характеризувались pH 2,7–3,6 та 9,0–10,8 відповідно і окисно-відновним потенціалом 300–1500 та –100…–700 мВ. Значення pH й окисно-відновний потенціал аноліту і католіту стабілізувались протягом двох діб [19] при зниженні цих показників на 3 % і 16–18 % відповідно.

У роботі використано також низку хімічних реагентів:

– поліфункціональної дії технічний панкреатин, що містить протеолітичні ензими;

– основний сульфат хрому (ОСХ) $Cr(OH)SO_4$ основністю 38–42 % (Казахстан, Актюбінський завод хромових сполук) з вмістом Cr_2O_3 25,4 % і молекулярною масою 498;

– екстракт квебрахо з вмістом танідів 72 % компанії Плазма (Україна);

– жирувальна композиція Trupol RA, що включала сульфатовані та сульфітовані синтетичні й натуральні реагенти аніонного типу виробництва компанії Trumpler (Німеччина). Вміст активних речовин складав 70 %, pH 10 % емульсії 7,5;

– акриловий полімер Retanal RCN-40 компанії Cromogenia Units SA (Іспанія);

– хлорид натрію технічний ДСТУ ISO 2479-2001;

– формат натрію CAS 141-53-7 АТК (Україна);
– алюмокалієвий галун $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ (Україна).

Властивості золеного напівфабрикату – голини визначали по топографічним ділянкам: спина, крупон, черево за методиками [20], а властивості шкіряного матеріалу – після кондиціювання зразків у стандартних умовах ексикаторним методом. Вологу в шкірі визначали гравіметричним методом при температурі наважки 102 ± 2 °С. Оксид хрому (ІІІ) – йодометричним титруванням. Речовини екстраговані органічними розчинниками (РЕОР) – за допомогою тетрахлорметану і трихлоретилену в співвідношенні 1/1 у апараті Зайченка. Зв'язані органічні дубильні речовини (ЗОД) розраховані за формулою:

$$ЗОД = ШР – ГР,$$

де $ШР = 100 – (З + ОР + ОР_В)$ – масова частка шкірної речовини в перерахунку на абсолютно суху шкіру; $З$, $ОР$, $ОР_В$, – масова частка відповідно золи в шкірі (ДСТУ ISO 4047:2006); органічних речовин, екстрагованих органічними розчинниками (ДСТУ EN ISO 20344) і органічних водовимивних речовин в шкірі (ДСТУ ISO 4098:2020); $ГР$ – масова частка голинної речовини в шкірі (ДСТУ ISO 937:2005).

Механічні властивості зразків шкіри: границя міцності при розриві σ_p, подовження при навантаженні 10 МПа і при розриві відповідно L_{10} та L_p отримані за допомогою розривної машини РМ-250М при відстані між затискачами 50 мм і швидкості деформування 90 мм/хв. Вихід площі шкіри S встановлено на машині моделі 07484/Р1 фірми Svit (Чехія).

Отримання еластичної шкіри з кінської сировини проведено шляхом виконання ряду послідовних технологічних процесів, у тому числі знезолювання-м'якшення голини, промивання, пікелювання, дублення, додублювання, наповнювання та сушильно-зволожувальних оброблень. Всі рідинні оброблення виконувались у барабані лабораторного типу об'ємом 18 дм^3 при обертанні зі швидкістю 16–18 хв$^{-1}$. При цьому за дослідною технологією на стадії відмочування-зольних процесів для отримання голини використано розчини хімічних реагентів на ЕХА воді, а контрольні зразки голини отримані за контрольною технологією. Фізико-хімічні властивості голини – гідротермічна стійкість $Г_с$, ступінь бубняви, щільність, вміст мінеральних речовин наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні властивості золеної голини

Показник голини	Дослідна технологія			Контрольна технологія		
	спина	крупон	черево	спина	Крупон	черево
$Г_с$, °С	51,0	54,0	49,0	52,0	59,0	53,0
Ступінь бубняви, %	21,0	19,5	22,5	23,5	20,5	25,0
Щільність, г/см^3	1,019	1,113	1,010	1,032	1,125	1,013
Мінеральні речовини, %	1,26	1,12	1,32	1,17	0,89	1,28

Порівняльний аналіз властивостей голини, отриманої за дослідною і контрольною технологіями, свідчить про більшу однорідність характеристик зразків дослідної технології. Це видно по нижчому значенню показника $Г_с$ найбільш щільної ділянки крупону дослідної технології, яка на 5 °С є нижчою відносно аналогічного зразка контрольної технології, що свідчить про вищий ступінь його прозоленість.

Водночас зразки всіх топографічних ділянок дослідної технології мають менший ступінь бубняви, вищу щільність і вміст мінеральних речовин. Отже, отримана голина за розробленою технологією характеризується більш ефективним проведенням відмочувально-зольних процесів з використанням ЕХА води.

Всі рідинні оброблення шкіряного напівфабрикату (таблиця 2) виконували у барабані лабораторного типу об'ємом 18 дм^3 при обертанні зі швидкістю 16–18 хв$^{-1}$. При цьому знезолювання-м'якшення голини проводили після її промивання. Для пікелювання голини використано аноліт з витратою 40 % маси голини. Використання аноліту замість технічної води на цій стадії оброблення напівфабрикату дало змогу зменшити витрати хлориду натрію у два рази, замінити 50 % сірчаної кислоти на 25 % мурашиної порівняно з діючою технологією, додавши [18]. Наступний процес дублення голини ОСХ проведено на відпрацьованому кислотно-сольовому розчині. У процесі структурування голини для прискорення дифузії та взаємодії ОСХ з колагеном дерми проводили маскування сполук хрому форміатом натрію. Це підвищило дубильні властивості сполук хрому і дало змогу зменшити витрати ОСХ на 20 % і скоротити тривалість процесу в 1,7 рази. При цьому отримати напівфабрикат з $Г_с$ 104 °С у ділянці крупону, що свідчить про утворення більш однорідно-структурованого шкіряного напівфабрикату з утворенням міжмакромолекулярних хімічних зв'язків комплексних сполук хрому.

У подальшому структурований напівфабрикат стругали на товщину 1,2–1,3 мм і промивали 150 % води з температурою 35 °С. Оскільки після стругання $Г_с$ ділянки крупону знизилась до 99 °С, то проведено додублювання напівфабрикату сполуками хрому. Цей процес виконаний в присутності аноліту з витратами 80 % і хромового дубителя у перерахунку на Cr_2O_3 1,2 % маси напівфабрикату. Після нейтралізації напівфабрикату форміатом і бікарбонатом натрію у співвідношенні 4/1 до pH 6,0–6,5 з наступним його промиванням 150 %

Таблиця 2

Технологія переддубильно-дубильних процесів напівфабрикату з шкур коней

Процес	Реагент / витрати, % маси голини	Режим
Промивання голини	Вода 32–34 °С – 150	20 хв об. Барабана
Знезолювання-м'якшення	Католіт 36–38 °С = 5/1– 20 Сульфат амонію – 3,0 Панкреатин – 0,05	 60 хв об.; pH 8,2–8,5 30 хв об., зливання
Промивання	Вода 18–20 °С – 2×150	двічі по 20 хв, об., зливання
Пікелювання	Аноліт 25–27 °С – 40 Хлорид натрію – 2,5 Форміат натрію – 0,4 Сірчана кислота – 0,6 Мурашина кислота 85 % – 0,3	 15 хв об. 30 хв об. 3 год об., pH 2,6–2,8
Дублення	ОСХ – 4,0 Форміат натрію – 0,25 Католіт/аноліт 7/1 45 °С – 30 Оксид магнію – 0,4	 2,5 год об. 4–4,5 год об., pH 3,6–3,8

води з температурою 55 °С проведено оброблення акриловим полімером Retanal RCN-40 і екстрактом квебрахо з витратами по 4,0 % кожного реагенту. При цьому для пластифікації структурованого напівфабрикату в реакційну систему додавали жирувальний реагент Trupol RA в кількості 7,0 % маси напівфабрикату. Для завершення процесів рідинного оздоблення напівфабрикату виконано його оброблення алюмокалієвим галуном при витраті 0,4–0,5 % маси напівфабрикату до pH 4,2. При цьому відбувається фіксація хімічних реагентів на фібрилярній структурі напівфабрикату. Розроблена технологія додублювання-наповнювання відрізняється від діючої використанням ЕХА води, зниженням витрат сполук хрому на 33,0 % та застосуванням алюмокалієвої фіксації реагентів. Процес формування еластичної шкіри з сировини коней завершується промиванням 150 % води з температурою 30 °С і сушильно-зволожувальними процесами, в яких півшкури розминаються на вібраційно-зволожувальній машині Молліса фірми Світ (Чехія).

Результати дослідження фізико-хімічних властивостей отриманої шкіри наведені в таблиці 3. Порівняльний аналіз шкіри, отриманої за розробленою і контрольною технологіями, свідчать про вищу однорідність властивостей дослідної шкіри по топографічним ділянкам. Це стосується в першу чергу масової частки сполук хрому в складі шкіри за меншої їх витрати та дещо більшого вмісту ЗОД.

Таблиця 3

Фізико-хімічні властивості шкіри

Показник	Дослідна технологія			Контрольна технологія		
	спина	крупон	черево	спина	крупон	черево
Масова частка*, %						
– оксиду хрому (III)	4,21	3,78	4,89	4,12	3,37	5,26
– РЕОР	8,67	6,76	9,04	8,11	5,86	9,93
– ЗОД	12,79	8,75	13,92	12,14	7,68	14,87
T_c шкіри, °С	114,0	111,0	115,0	109,0	105,0	112,0
Щільність, г/см^3	0,62	0,66	0,57	0,64	0,69	0,51
σ_p, МПа	18,9	23,1	16,7	17,8	22,1	16,4
L_{10}, %	37,0	26,0	40,0	33,0	23,0	38,0
L_p, %	62,0	49,0	68,0	59,0	45,0	67,0
S, дм^2/10 кг сировини	153,0			146,2		

Примітка. * Складові шкіри наведені у перерахунку на нульову вологість.

Водночас більший вміст жирових речовин у зразках дослідного напівфабрикату може сприяти підвищеній мобільності елементів його структури при деформуванні. Це супроводжується вищим виходом шкіри на 4,65 %. Еластичні шкіри отримані з використанням розчинів реагентів на ЕХА воді при зменшеній витраті сполук хрому на процеси дублення і додублювання та скороченні тривалості технологічних оброблень, відповідають вимогам ДСТУ 3115-95 на шкіри для швейних виробів і можуть бути використані для взуттєвих та одягових виробів широкого асортименту.

Висновки

Розроблена технологія процесів знезолювання-м'якшення, пікелювання, дублення та додублювання при формуванні еластичної шкіри з кінської сировини з використанням розчинів реагентів на електрохімічно активованій воді. Така технологія відрізняється від відомих одночасним обробленням всіх топографічних ділянок шкури коня. Показано ефективне використання католіту в процесах знезолювання-м'якшення шкіряного напівфабрикату,

аноліту при пікелюванні і суміші аноліту з католітом на стадіях дублення. Встановлено зменшення витрат хлориду натрію і сірчаної кислоти при пікелюванні голини у два рази та скорочення процесу в 1,7 рази порівняно з діючою технологією. Водночас зменшено витрати сполук хрому на 20 % і 33 % відповідно при дубленні та додублюванні напівфабрикату. Отримана еластична шкіра переважає контрольний зразок як за кількістю хімічно зв'язаних реагентів з колагеном напівфабрикату при менших їх витратах, так і за комплексом фізико-хімічних показників і відповідає ДСТУ 3115-95 «Шкіри для швейних виробів». Розроблену технологію формування еластичної шкіри з кінської сировини з використання розчинів реагентів на хімічно активованій воді можна віднести до масоощадних і екологічно орієнтованих.

Список використаної літератури

1. Fidaleo M., Moresi M. Electrodialysis applications in the food industry. *Advances in Food and Nutrition Research*. 2006. Volume 51. P. 265–360.
2. Saravanan P., Raghava Rao J. Cleaner technologies and pollution reduction in leather manufacturing. *The Journal of Indian Leather Technologists' Association*. 2010. Volume 8. P. 668–671.
3. Jing Li, Yan L., Shi B. A Novel Approach to Clean Tanning Technology. *J. Chem. Chem. Eng*. 2013. Volume 30. P. 1203–1212.
4. Zeng, Y. & el. A Cleaner Deliming Process Using Sodium Gluconate for Reduction in Nitrogen Pollution in Leather Manufacture. *JALCA*. 2018. Volume 113, Issues 1. P. 19–25.
5. Сєрікова А.Ю., Ніконова А.В., Андреєва О.А. Дослідження складу і токсичності розчинів для обробки шкіряного напівфабрикату перед дубленням. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2017. № 5(253). С. 67–70.
6. Biškauskaitė R., Valeikienė V., & Valeika V. Enzymes for leather processing: effect on pickling and chroming. *Materials*. 2021. 14(6). 1480.
7. Zeng Y., Wang Y., Song Y. & el. An integrated pickling-bating technology for reducing ammonia-nitrogen and chloride pollution in leather manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2022. 375, 134070.
8. Yao Q., Li C., Huang H. & el. The relationship between the structure of hyper-branched polymer and its effect on high exhaust chrome in reduced chrome tanning. *JALCA*. 2017. Volume 112 (5). P. 153–161.
9. Cheng B., Chen J. Microbial transglutaminases as pre-tanning agents in the leather industry. *JALCA*. 2015. Volume 110(4). P. 103–108.
10. Abd El-Monem, F., Hussain, A.I., Nashy, EL-S. H. A. & el. Nano-emulsion based on acrylic acid ester co-polymer derivatives as an efficient pre-tanning agent for buffalo hide. *Arabian Journal of Chemistry*. 2017. Volume 10, Supplement 2. P. S3861–S3869. URL: https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.024 (date of access: 10.12.2024).
11. Ніконова А.В., Андреєва О.А., Майстренко Л.А. Визначення оптимальних умов титанового дублення в присутності полімерної сполуки на основі малеїнової кислоти. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2016. № 1(233). С. 196–201.
12. Andreyeva O., Nikonova A., Maistrenko L. Investigation on polymer-mineral tanned leather. *Properties Solid State Phenomena*. 2017. Volume 267. P. 98–102. DOI: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.267.98 (date of access: 15.12.2024).
13. Кашковський В.І., Каменських Д.С. Застосування активованої води в процесі кислотного гідролізування рослинних відходів з високим вмістом пентозанів. *Papers, presentations 9th International Conference WasteECo-2012 "Cooperation for Waste Issues", Kharkiv, Ukraine, March 28–29, 2012*. URL: http:waste.ua/eco/2012/biomass/hydrolysis/ (дата звернення: 16.01.2025).
14. Lee M.Y., Kim Y.K., Ryoo K.K. et al. Electrolyzed-reduced water protects against oxidative damage to DNA, RNA, and protein. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2006. Volume 135(2). P. 133–144.
15. Злотенко Б.М., Данилкович А.Г., Матвієнко О.А. та ін. Екологічно чисті технології легкої промисловості на основі використання активованих водних розчинів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2008. № 1. Т. 2. С. 127–130.
16. Cloete T.E., Thantsha M.S., Maluleke M.R., Kirkpatrick R. The antimicrobial mechanism of electrochemically activated water against Pseudomonas aeruginosa and Escherichia coli as determined by SDS-PAGE analysis. *Journal of Applied Microbiology*. 2009. Volume 107. Issue 2. P. 379–384.
17. Robinson G.M., Lee S. W.-H., Salisbury V.C. and Reynolds D.M. Evaluation of the efficacy of electrochemically activated solutions against nosocomial pathogens and bacterial endospores. *Letters in Applied Microbiology*. 2009. Volume 50. Issue 3. P. 289–294.
18. Данилкович А.Г. Основні матеріали і технології виробництва шкіри. Київ, 2016. 175 с.
19. Бордун І.М., Пташник В.В. Вплив умов зберігання на процеси релаксації у електрохімічно активованій воді. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2012. 1/6(55). С. 27–30.
20. Данилкович А.Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра: 2 вид., перероб. і доп. Київ, 2006. 340 с.

References

1. Fidaleo M., Moresi M. (2006) Electrodialysis applications in the food industry. *Advances in Food and Nutrition Research*, volume 51, pp. 265–360.

2. Saravanan P., Raghava Rao J. (2010) Cleaner technologies and pollution reduction in leather manufacturing. *The Journal of Indian Leather Technologists' Association*, volume 8, pp. 668–671.

3. Jing Li, Yan L., Shi B. (2013) A Novel Approach to Clean Tanning Technology. *J. Chem. Chem. Eng*, volume 30, pp. 1203–1212.

4. Zeng, Y. & el. (2018). A Cleaner Deliming Process Using Sodium Gluconate for Reduction in Nitrogen Pollution in Leather Manufacture. *JALCA*, volume 113, issue 1, pp. 19–25.

5. Serikova A.Yu., Nikonova A.V., Andreyeva O.A. (2017) Doslidzhennia skladu i toksychnosti rozchyniv dlia obrobky shkirianoho napivfabrykatu pered dublenniam. [Study of the composition and toxicity of solutions for processing leather semi-finished products before tanning]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, no. 5(253), pp. 67–70.

6. Biškauskaitė, R., Valeikienė, V. & Valeika, V. (2021) Enzymes for leather processing: effect on pickling and chroming. *Materials*, 14(6), p. 1480.

7. Zeng Y., Wang, Y., Song Y. & el. (2022) An integrated pickling-bating technology for reducing ammonia-nitrogen and chloride pollution in leather manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 375, p.134070.

8. Yao, Q., Li, C., Huang, H. & el. (2017) The relationship between the structure of hyper-branched polymer and its effect on high exhaust chrome in reduced chrome tanning. *JALCA*, volume 112 (5), pp. 153–161.

9. Cheng, B., Chen, J. (2015) Microbial transglutaminases as pre-tanning agents in the leather industry. *JALCA*, Volume 110 (4), pp. 103–108.

10. Abd El-Monem, F., Hussain, A.I., Nashy, EL-S. H.A. & el. (2017) Nano-emulsion based on acrylic acid ester co-polymer derivatives as an efficient pre-tanning agent for buffalo hide. *Arabian Journal of Chemistry*, volume 10, supplement 2, pp. S3861–S3869. URL : https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2014.05.024 (date of access: 10.12.2024).

11. Nikonova A.V., Andreieva O.A., Maistrenko L.A. (2016) Vyznachennia optymalnykh umov tytanovoho dublennia v prysutnosti polimernoi spoluky na osnovi maleinovoi kysloty. [Determination of optimal conditions for titanium tanning in the presence of a polymer compound based on maleic acid]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, no. 1(233), pp. 196–201.

12. Andreyeva O., Nikonova A., Maistrenko L. (2017) Investigation on polymer-mineral tanned leather. *Properties Solid State Phenomena*, volume 267, pp. 98–102. URL: https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.267.98 (date of access: 10.12.2024).

13. Kashkovsky, V.I., Kamenskykh, D.S. (2012) Application of activated water in the process of acid hydrolysis of vegetable waste with a high content of pentosans. *Papers, presentations 9th International Conference WasteECo-2012 "Cooperation for Waste Issues", Kharkiv, Ukraine, March 28–29*. URL: http:waste.ua/eco/2012/biomass/hydrolysis/ (date of access: 16.01.2025).

14. Lee M.Y., Kim Y.K., Ryoo K.K. et al. (2006). Electrolyzed-reduced water protects against oxidative damage to DNA, RNA, and protein. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, volume 135(2), pp. 133–144.

15. Zlotenko B.M., Danylkovych A.H., Matviienko O.A. ta in. (2008) Ekolohichno chysti tekhnolohii lehkoi promyslovosti na osnovi vykorystannia aktyvovanykh vodnykh rozchyniv. [Environmentally friendly technologies of light industry based on the use of activated aqueous solutions]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu*, no. 1, vol. 2, pp. 127–130.

16. Cloete, T.E., Thantsha, M.S., Maluleke, M.R., Kirkpatrick, R. (2009) The antimicrobial mechanism of electrochemically activated water against Pseudomonas aeruginosa and Escherichia coli as determined by SDS-PAGE analysis. *Journal of Applied Microbiology*, volume 107, issue 2, pp. 379–384.

17. Robinson G.M., Lee S.W.-H., Salisbury V.C. and Reynolds D.M. (2009) Evaluation of the efficacy of electrochemically activated solutions against nosocomial pathogens and bacterial endospores. *Letters in Applied Microbiology*, volume 50, issue 3, pp. 289–294.

18. Danylkovych A.H. (2016) Osnovni materialy i tekhnolohii vyrobnytstva shkiry. [Basic materials and technologies of leather production]. Kyiv, 175 s. [in Ukrainian].

19. Bordun I.M., Ptashnyk V.V. (2012) Vplyv umov zberihannia na protsesy relaksatsii u elektrokhimichno aktyvovanii vodi.[Effect of storage conditions on relaxation processes in electrochemically activated water]. *Skhidno-ievropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, 1/6(55), pp. 27–30.

20. Danylkovych A.H. (2006) Praktykum z khimii i tekhnolohii shkiry ta khutra [Workshop on chemistry and technology of leather and fur]: 2 vyd., pererob. i dop. Kyiv, 340 s. [in Ukrainian].

УДК 664 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.43

А. В. ЄВТУШЕНКО
аспірант
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7103-9186

Г. А. БОЙКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0001-8773-5525

СУЧАСНИЙ СТАН ПЕРВИННОЇ ПЕРЕРОБКИ ЛУБ'ЯНИХ КУЛЬТУР

Первинна переробка луб'яних культур є важливим елементом агропромислового комплексу, оскільки забезпечує виробництво високоякісної сировини для текстильного, паперового, будівельного та інших секторів промисловості. Враховуючи екологічні виклики сучасності, луб'яні культури набувають особливої актуальності завдяки своїй біорозкладності та відновлюваності. Розвиток інноваційних методів первинної переробки сприяє раціональному використанню сільськогосподарських ресурсів, підвищенню продуктивності аграрного сектору та забезпеченню конкурентоспроможності продукції на міжнародному ринку.

Серед сучасних технологій переробки луб'яних культур виділяються механіко-біологічні, ультразвукові, ферментативні, паро термічні та електроімпульсні методи. Кожен із них має свої переваги та недоліки. Зокрема, механіко-біологічні методи дозволяють отримати якісні волокна при мінімальному використанні хімічних реагентів, проте характеризуються значною тривалістю процесу та високими витратами на обладнання. Ультразвукова обробка прискорює вилучення волокон, зменшує ламкість та мінімізує залишкові компоненти, однак вимагає дорогого обладнання та ретельного контролю параметрів. Ферментативна переробка є екологічно безпечною та енергоефективною, але потребує значних фінансових вкладень у ферменти та спеціалізоване обладнання. Паро термічний метод забезпечує високу якість волокон без використання хімікатів, проте має високі вимоги до температурного контролю та значні енергетичні витрати на етапі підігріву. Електроімпульсна обробка дозволяє підвищити ефективність вилучення волокон та знизити енергетичні витрати, однак технологія потребує подальших досліджень для широкомасштабного впровадження.

Проведений аналіз засвідчив, що усунення недоліків існуючих методів можливе шляхом вдосконалення технологічних процесів, автоматизації та впровадження сучасного обладнання. Оптимізація параметрів ультразвукової та ферментативної обробки, модернізація механіко-біологічних та паро термічних методів, а також розвиток електроімпульсних технологій сприятимуть підвищенню ефективності первинної переробки луб'яних культур. Це, у свою чергу, сприятиме розширенню сфер застосування відновлюваної сировини, зменшенню екологічного навантаження та розвитку «зеленої» економіки.

Ключові слова: *первинна переробка, луб'яні культури, методи, інновації.*

A. V. YEVTUSHENKO
Postgraduate Student
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-7103-9186

H. A. BOIKO
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Commodity Studies, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0001-8773-5525

CURRENT STATUS OF PRIMARY PROCESSING OF BAS CROPS

The primary processing of bast crops is a crucial element of the agro-industrial complex, as it ensures the production of high-quality raw materials for the textile, paper, construction, and other industrial sectors. Given the modern environmental challenges, bast crops are gaining particular relevance due to their biodegradability and renewability. The development of innovative primary processing methods contributes to the rational use of agricultural resources, increased productivity in the agricultural sector, and enhanced competitiveness of products in the international market.

Among modern bast crop processing technologies, mechanical-biological, ultrasonic, enzymatic, steam-thermal, and electro-pulse methods stand out. Each of them has its advantages and disadvantages. In particular, mechanical-

biological methods allow for obtaining high-quality fibers with minimal use of chemical reagents; however, they are characterized by long processing times and high equipment costs. Ultrasonic treatment accelerates fiber extraction, reduces brittleness, and minimizes residual components, but it requires expensive equipment and precise parameter control. Enzymatic processing is environmentally safe and energy-efficient but requires significant financial investment in enzymes and specialized equipment. The steam-thermal method ensures high fiber quality without chemicals; however, it has strict temperature control requirements and high energy consumption during the heating stage. Electro-pulse processing improves fiber extraction efficiency and reduces energy consumption, yet the technology requires further research for large-scale implementation.

The conducted analysis has demonstrated that the disadvantages of existing methods can be addressed by improving technological processes, automation, and the introduction of modern equipment. Optimizing the parameters of ultrasonic and enzymatic treatments, modernizing mechanical-biological and steam-thermal methods, and advancing electro-pulse technologies will enhance the efficiency of bast crop primary processing. This, in turn, will contribute to the expansion of renewable raw material applications, reduction of environmental impact, and the development of the «green» economy.

Key words: *primary processing, bast crops, methods, innovations.*

Постановка проблеми

У сучасних умовах галузь первинної переробки луб'яних культур в Україні демонструє позитивну динаміку розвитку, особливо в секторі промислових конопель. В Україні повноцінно функціонують чотири заводи з первинної переробки конопель, п'ятий – на стадії запуску [1]. Однак, галузь стикається з низкою викликів, що впливають на ефективність виробництва, якість сировини та конкурентоспроможність галузі. Основні проблеми включають: застарілі методи обробки – у багатьох підприємствах використовуються механічні технології, що потребують значних енерговитрат і не забезпечують достатньо високу якість волокна. Недостатнє впровадження інновацій – перспективні методи, такі як електроімпульсна, ультразвукова, ферментативна та паротермічна обробка, не набули широкого поширення через високу вартість обладнання та недостатню кількість досліджень. Високий рівень втрат сировини – неефективні технології переробки призводять до значних відходів, що знижує рентабельність виробництва.

Тому, дослідження сучасних технологій, їх переваг та недоліків та обґрунтування вибору методів первинної переробки є актуальним у сучасних умовах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження в галузі первинної переробки луб'яних культур в Україні зосереджені на впровадженні інноваційних технологій, удосконаленні механізації процесів та розробці нових сортів для підвищення ефективності виробництва. Зокрема, досліджуються методи, які дозволяють зменшити енергоспоживання та підвищити якість отримуваних волокон та базуються на механічних впливах, аналізуються сучасні механізми та обладнання, що забезпечують ефективну первинну обробку сировини [2, 3]. Використання ультразвукових кавітаційних апаратів застосовується для екологічно чистого вилучення пектину та обробці вже готового волокна [4, 5]. Дослідження, представлені у науковій праці [6] присвячені різним методам обробки луб'яних культур, включаючи ферментативні та паро термічні підходи, з метою покращення фізико-механічних властивостей волокон. Однак, деякі ферментативні процеси складно адаптувати для великого виробництва через необхідність підтримки специфічних умов.

Формулювання мети дослідження

Визначення основних переваг і недоліків кожної із сучасних технологій первинної переробки луб'яних культур у контексті їх застосування в сучасних умовах сільського господарства та промисловості.

Викладення основного матеріалу дослідження

Первинна переробка луб'яних культур є важливим елементом агропромислового комплексу, оскільки вона забезпечує виробництво сировини високої якості для таких галузей, як текстильна, паперова, будівельна та інших. В умовах сучасних екологічних проблем луб'яні культури стають все більш актуальними завдяки своїй екологічності, здатності до біологічного розкладання та відновлюваності. Розвиток процесів первинної переробки сприяє ефективному використанню сільськогосподарських ресурсів, покращенню продуктивності аграрного виробництва. Впровадження інноваційних технологій в первинну переробку дозволяє отримувати волокна високої якості, зменшувати кількість відходів та енергетичних витрат, що є важливими факторами для забезпечення конкурентоспроможності на міжнародному ринку. Крім того, розвиток цієї галузі сприяє збільшенню робочих місць у сільських районах, розвитку «зеленої» економіки та зменшенню залежності від імпортної продукції.

Інноваційні методи механіко-біологічної переробки забезпечують екологічність процесу, скорочуючи використання хімічних речовин. Використання ультразвукових, ферментативних та паро термічних обробок дозволяє отримати більш міцні та довговічні волокна, знижуючи їх ламкість. Крім того, сучасні технології дозволяють комплексно використовувати сировину, отримуючи не лише волокна, а й вторинні продукти (целюлозу, біопаливо). Інновації у первинній переробці луб'яних культур сприяють зниженню собівартості, підвищенню конкурентоспроможності продукції та розвитку сталого виробництва.

Розглянемо переваги та недоліки існуючих методів первинної переробки луб'яних культур (таблиця 1).

Таблиця 1

Переваги та недоліки сучасних методів первинної переробки луб'яних культур

Переваги	Недоліки
1	2
Механіко-біологічні методи	
Екологічність – мінімальне використання хімічних реагентів, що знижує негативний вплив на довкілля. Збереження якості волокна – механічна обробка у поєднанні з біологічними методами дозволяє отримати довгі, міцні та еластичні волокна. Раціональне використання сировини – технології забезпечують комплексну переробку, дозволяючи отримувати не лише волокна, а й супутні продукти (олію, целюлозу, кормові добавки). Енергоефективність – сучасні механічні установки споживають менше енергії порівняно із традиційними методами. Стійкість до механічних пошкоджень – біологічні процеси пом'якшують луб'яні волокна, зменшуючи їх ламкість при подальшій обробці	Тривалість процесу – біологічні методи займають більше часу у порівнянні з хімічною переробкою. Складність контролю – необхідність точного дотримання температурного та вологісного режимів. Витрати на обладнання – високотехнологічне механічне обладнання є дорогими у придбанні та обслуговуванні. Обмежена продуктивність – механіко-біологічні методи можуть поступатися за обсягами переробки хімічним та комбінованим технологіям. Ризики інфікування сировини – при недотриманні санітарних норм можливе розмноження небажаних мікроорганізмів під час біопереробки
Ультразвукові методи	
Висока якість волокон – ультразвук дбайливо розщеплює пектинові сполуки, зберігаючи довжину та міцність волокон. Екологічність – відсутність або мінімальне використання хімічних реагентів робить метод безпечним для довкілля. Швидкість обробки – ультразвукова обробка значно скорочує час, необхідний для виділення волокон. Енергоефективність – зменшення споживання енергії у порівнянні із традиційними методами. Зниження відходів – ультразвук сприяє більш повному вилученню волокон і мінімізації залишкових компонентів	Висока вартість обладнання – ультразвукові установки є дорогими, що ускладнює їх широке впровадження, особливо для малих і середніх підприємств. Обмежені обсяги переробки – сучасні ультразвукові системи здебільшого орієнтовані на малі та середні партії сировини, що може бути недостатнім для масового виробництва. Великі енергозатрати при масштабуванні – хоча метод є енергоефективним на малих обсягах, при збільшенні масштабів виробництва енергоспоживання суттєво зростає. Складність технологічного процесу – потрібен ретельний контроль параметрів ультразвукового впливу (частоти, потужності, часу обробки), що вимагає високої кваліфікації персоналу. Знос деталей обладнання – тривала робота ультразвукових генераторів у жорстких умовах може призводити до швидкого зносу робочих деталей і необхідності частого технічного обслуговування. Обмежена ефективність для деяких культур – ультразвукові методи можуть виявитися менш ефективними для луб'яних культур із високим вмістом лігніну та пектину, що потребують додаткової обробки
Ферментативна переробка луб'яних культур	
Екологічність – безпечність для довкілля, оскільки не використовують агресивні хімічні речовини. Висока якість волокон – ферменти м'яко розщеплюють пектинові речовини, зберігаючи довжину, міцність і еластичність луб'яних волокон. Енергоефективність – процеси відбуваються за відносно низьких температур, що знижує енерговитрати. Біорозкладність відходів – побічні продукти ферментативної переробки легко утилізуються та можуть використовуватися як добрива або кормові добавки. Мінімальне зношування обладнання – м'який характер ферментативної дії знижує механічне навантаження на обладнання, подовжуючи термін його служби. Універсальність – ферменти можуть застосовуватися для переробки різних видів луб'яних культур, включно з льоном, коноплями та кенафом	Висока вартість ферментів – біокаталізатори є дорогими, що підвищує собівартість кінцевої продукції. Тривалість процесу – ферментативна обробка потребує більше часу в порівнянні з механічними чи хімічними методами. Складність контролю – ферментативні реакції чутливі до змін температури, pH та інших параметрів, що ускладнює їх регулювання. Обмежені обсяги виробництва –застосовуються переважно для невеликих і середніх обсягів сировини. Ризик контамінації – при недотриманні санітарних норм можливе зараження сировини небажаними мікроорганізмами. Потреба у спеціалістах – для управління ферментативними процесами потрібні висококваліфіковані кадри
Паро термічна переробка луб'яних культур	
Екологічність – відсутність хімічних реагентів робить цей метод екологічно чистим та безпечним для навколишнього середовища. Збереження якості волокон – парова обробка не пошкоджує структуру волокон, зберігаючи їх міцність та еластичність. Висока ефективність – процес дозволяє швидко і ефективно відокремити луб'яні волокна від стебел. Зниження енергозатрат – порівняно з іншими методами обробки (наприклад, хімічними або механічними) паро термічна обробка є енергоефективнішою. Підвищення якості кінцевої продукції – волокна, отримані після паро термічної обробки, мають високу якість, що робить їх придатними для виробництва текстильних матеріалів, паперу та інших виробів	Високі вимоги до обладнання – процес потребує спеціалізованого обладнання, здатного створювати високий тиск і температуру для ефективної обробки. Складність контролю процесу – необхідний точний контроль за температурою, тиском і часом впливу пари, оскільки порушення цих параметрів може вплинути на якість обробки. Великі енергозатрати на етапі підігріву – для нагрівання води до необхідної температури та створення пари може бути потрібно значне споживання енергії. Можливість зменшення продуктивності – при масштабуванні процесу можуть виникати труднощі з підтриманням постійної якості обробки на великих обсягах сировини. Обмеження щодо сировини – паро термічна переробка може бути менш ефективною для певних видів луб'яних культур або в разі їх недостатньої підготовленості до обробки

Закінчення Таблиці 1

1	2
Електроімпульсна обробка луб'яних культур	
Підвищення ефективності вилучення волокон – руйнування міжклітинних зв'язків сприяє кращому відокремленню волокнистої частини. Зменшення енергетичних витрат – у порівнянні з механічними методами обробки, цей процес вимагає менше енергії та зусиль. Екологічність – відсутність хімічних реагентів знижує негативний вплив на навколишнє середовище. Поліпшення якості волокон – отримані волокна мають кращі фізико-механічні властивості, що підвищує їх цінність для текстильної та інших галузей	Висока вартість обладнання – технологія потребує спеціальних генераторів імпульсів. Складність контролю параметрів – необхідний ретельний підбір напруги та частоти імпульсів для різних типів сировини. Необхідність додаткових досліджень – метод ще не набув масового поширення, що вимагає подальшої оптимізації технології

Проведений аналіз свідчить про наявність переваг та недоліків кожного із сучасних методів первинної переробки луб'яних культур.

Усунення недоліків механіко-біологічного методу переробки луб'яних культур можливе шляхом удосконалення технологічних процесів та впровадження інноваційних рішень. Зокрема, за рахунок використання сучасного обладнання із регульованими параметрами та автоматизації процесів за рахунок використання датчиків та систем контролю. Біологічний етап цього процесу можна покращити підбором екологічних препаратів для прискореного розкладання пектинових речовин та скорочення тривалості ферментації.

Ефективність первинної переробки луб'яних культур ультразвуком можна значно підвищити шляхом оптимізації параметрів ультразвукової обробки, вдосконалення технології та інтеграції ультразвукових технологій з іншими методами переробки.

Ферментативна переробка луб'яних культур має великий потенціал завдяки своїй екологічності та високій якості отриманих волокон, проте вимагає подальших досліджень та удосконалення для масштабного промислового застосування.

Паро термічна переробка луб'яних культур є технологією із великою кількістю переваг, зокрема в плані екологічності та якості продукції, але вона також потребує спеціалізованого обладнання та контролю за процесами.

Електроімпульсна обробка може стати ефективною альтернативою традиційним методам первинної переробки луб'яних культур, особливо в умовах зростаючих вимог до екологічності та енергоефективності виробництва. Оптимізація параметрів електроімпульсного впливу, зменшення енерговитрат, покращення рівномірності обробки сировини дозволить зробити електроімпульсну переробку луб'яних культур більш ефективною, енергоощадною та екологічно безпечною. Це сприятиме збільшенню виходу високоякісного волокна, скороченню виробничих витрат та підвищенню конкурентоспроможності галузі.

Висновки

Проведене дослідження підтверджує значущість первинної переробки луб'яних культур для формування якісної сировинної бази в різних сферах промисловості. В умовах загострення екологічних викликів застосування інноваційних технологій є ключовим фактором підвищення ефективності виробництва, мінімізації негативного впливу на природу та покращення економічних показників.

Вибір найбільш ефективного методу первинної переробки луб'яних культур залежить від різних факторів, таких як вид луб'яної культури, обсяг виробництва, екологічні вимоги та економічні можливості.

Список використаної літератури

1. На Житомирщині будують завод з переробки технічних конопель | Think brave. Think brave | Останні новини бізнесу України. URL: https://biz.ligazakon.net/news/233452_na-zhitomirshchin-buduyut-zavod-z-pererobki-tekhnchnikh-konopel (дата звернення: 01.02.2025).

2. Березовський Ю., Кузьміна Т. Аналіз інноваційної переробки сировини луб'яних культур. Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. 2022. № 30. С. 29–36.

3. Berezovsky Y. V. Technical Solution for Scutching Bast Raw Material. Nauka ta innovacii. 2018. Vol. 14, no. 1. P. 26–39. URL: https://doi.org/10.15407/scin14.01.026 (date of access: 10.02.2025).

4. Луговський О. Ф., Берник І. М. Ультразвукові кавітаційні апарати для реалізації екологічно безпечної технології вилучення пектину з вторинної рослинної сировини // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. 2010. № 58. С. 82–86.

5. Дорофєєв В. В., Разумєєв К. Е., Захаров В. Н., Бубнов Г. Г., Семенов А. В. Порівняльна оцінка прядильної здатності котонізованого волокна технічних конопель після ударно-хвильового впливу // Швейна промисловість. 2013. № 4. С. 41–42.

6. Ягелюк С. В., Дідух В. Ф. Формування якості льняної продукції : монографія. Луцьк. 2021. 140 с.

References

1. Think brave. (2025, February 1). *На Житомирщині будують завод з переробки технічних конопель* [A plant for processing technical hemp is being built in Zhytomyr region]. Think brave. Think brave | Останні новини бізнесу України. Retrieved from https://biz.ligazakon.net/news/233452_na-zhitomirshchin-buduyut-zavod-z-pererobki-tekhnchnikh-konopel

2. Berezovskyi, Y., & Kuzmina, T. (2022). Analysis of innovative processing of bast crop raw materials. *Bulletin of Lviv University of Trade and Economics. Technical Sciences*, (30), 29–36.

3. Berezovsky, Y. V. (2018). Technical solution for scutching bast raw material. *Nauka ta innovacii, 14*(1), 26–39. https://doi.org/10.15407/scin14.01.026

4. Luhovskyi, O. F., & Bernyk, I. M. (2010). Ultrasonic cavitation devices for implementing an environmentally safe technology of pectin extraction from secondary plant raw materials. *Bulletin of NTUU "KPI". Mechanical Engineering*, (58), 82–86.

5. Dorofeev, V. V., Razumeev, K. E., Zakharov, V. N., Bubnov, G. G., & Semenov, A. V. (2013). Comparative assessment of the spinning ability of cottonized fiber of technical hemp after impact-wave treatment. *Sewing Industry*, (4), 41–42.

6. Yahilyuk, S. V., & Didukh, V. F. (2021). *Formation of linen product quality: Monograph*. Lutsk.

УДК 664 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.44

В. В. ЄВТУШЕНКО
кандидат технічних наук,
доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8720-5804

О. В. ФУРСА
аспірант
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-7448-3874

ВИМОГИ ДО ЗБИРАННЯ ЛЬОНУ ОЛІЙНОГО ДЛЯ ПОДАЛЬШОЇ ПЕРЕРОБКИ НА ВОЛОКНО

У сучасних умовах, коли зростає попит на екологічно чисті матеріали та відновлювані ресурси, льон олійний набуває особливого значення як перспективна сировина для виробництва волокна в Україні. Незважаючи на те, що основною метою його вирощування є отримання насіння для виробництва олії, стеблова частина рослини містить цінне волокно, яке знаходить широке застосування у текстильній, паперовій та біотехнологічній галузях. Використання стебел цієї культури відкриває значні економічні та агротехнологічні можливості: воно підвищує прибутковість агропідприємств, сприяє механізації процесу збирання врожаю та забезпечує раціональне використання ресурсів. Крім того, льоноволокно має високий рівень екологічної безпеки, адже воно повністю біологічно розкладається, не вимагає значних витрат води та мінімально залежить від застосування хімічних препаратів, що робить його більш екологічно прийнятним у порівнянні з іншими природними волокнами.

Наукові дослідження, проведені в останні роки, акцентують увагу на вдосконаленні методів збору та первинної переробки льону олійного. Зокрема, встановлено, що застосування десикації у фазі жовтої стиглості дозволяє зменшити втрати врожаю та підвищити якість сировини. Використання роздільного способу збирання у поєднанні з сучасною спеціалізованою технікою виявилося ефективним у регіонах зі складними кліматичними умовами, сприяючи збереженню стеблової маси та її подальшій якісній переробці. Додатковим напрямком оптимізації є вторинне використання льонової соломи для виробництва біопалива чи екологічних композитних матеріалів, що дозволяє наблизитися до концепції безвідходного виробництва.

Дослідження спрямоване на розробку оптимальних методів збору та початкової обробки льону олійного з метою отримання якісного волокна. У роботі враховано основні агротехнічні, технологічні, економічні та екологічні аспекти цього процесу, а також запропоновано рекомендації щодо підвищення ефективності механізованого збору, мінімізації втрат врожаю та удосконалення післязбиральної підготовки сировини. Впровадження інноваційних підходів у цій сфері сприятиме підвищенню рентабельності вирощування льону, забезпеченню його конкурентоспроможності на міжнародному ринку та формуванню екологічно відповідального виробничого циклу.

Ключові слова: *льон олійний, волокно, збирання, переробка, екологічність, технології, рентабельність.*

V. V. YEVTUSHENKO
Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor at the Department of Commodity Studies, Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8720-5804

O. V. FURSA
Postgraduate Student
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-7448-3874

REQUIREMENTS FOR HARVESTING OIL FLAX FOR FURTHER FIBER PROCESSING

In modern conditions, with the growing demand for environmentally friendly materials and renewable resources, oil flax is gaining particular importance as a promising raw material for fiber production in Ukraine. Although its primary purpose is seed production for oil extraction, the plant's stems contain valuable fiber widely used in the textile, paper, and biotechnology industries. Utilizing the stems of this crop opens up significant economic and agro-technological opportunities: it increases the profitability of agricultural enterprises, promotes the mechanization of the harvesting process, and ensures the rational use of resources. Moreover, flax fiber has a high level of environmental safety,

as it is fully biodegradable, requires minimal water consumption, and depends less on chemical treatments, making it more environmentally friendly compared to other natural fibers.

Scientific studies conducted in recent years have focused on improving oil flax harvesting and primary processing methods. In particular, it has been established that using desiccation at the yellow ripeness stage helps reduce harvest losses and improve raw material quality. The application of a separate harvesting method combined with modern specialized equipment has proven effective in regions with challenging climatic conditions, ensuring the preservation of stem mass for further quality processing. Another promising optimization approach is the secondary use of flax straw for biofuel production or eco-friendly composite materials, contributing to the concept of zero-waste production.

The research aims to develop optimal methods for harvesting and initial processing of oil flax to obtain high-quality fiber. The study considers the key agro-technical, technological, economic, and environmental aspects of this process and offers recommendations for improving the efficiency of mechanized harvesting, minimizing harvest losses, and enhancing post-harvest preparation. Implementing innovative approaches in this field will contribute to increasing the profitability of flax cultivation, ensuring its competitiveness in the international market, and fostering an environmentally responsible production cycle.

Key words: *oil flax, fiber, harvesting, processing, environmental sustainability, technologies, profitability.*

Постановка проблеми

В умовах зростаючого попиту на екологічні матеріали та відновлювані ресурси льон олійний стає перспективною сировиною для виробництва волокна в Україні. Хоча основне його призначення – отримання олії із насіння, стебла також містять волокно, яке може бути використане у різних галузях промисловості. Використання цього волокна має економічні та аграрні переваги, які характеризуються збільшенням прибутковості господарств – використання соломи як додаткового продукту підвищує рентабельність вирощування льону олійного; невибагливість до умов вирощування – льон добре росте в помірному кліматі України, зокрема в Поліссі та Лісостепу; можливість механізованого збирання – сучасні технології дозволяють одночасно збирати насіння та підготувати стебла для подальшої переробки. Крім того використання цієї сировини враховує також й екологічні аспекти, оскільки волокно льону є біологічно розкладним, екологічно безпечним і не забруднює довкілля; на відміну від бавовни, льон потребує менше води та пестицидів; вторинне використання стебел сприяє ефективному ресурсозбереженню.

Для ефективного використання цієї сировини необхідно розробити оптимальні методи збирання та первинної обробки, що потребує детальних наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні наукові роботи, що аналізують вимоги до збирання льону олійного для подальшої переробки на волокно, зосереджені на вдосконаленні технологічних підходів. Основна мета цих досліджень – покращення якості отриманого волокна та підвищення загальної продуктивності виробничих процесів.

Згідно з дослідженнями О. Л. Рудіка та Вожегової Р. А. [1, 2], застосування десикації на етапі жовтої стиглості льону олійного позитивно впливає на ефективність збору врожаю, зменшуючи його втрати. Використання таких препаратів, як Реглон Супер, Раундап та Баста, дає змогу скоротити втрати врожаю на 0,07–0,14 т/га та покращити якісні характеристики соломи, що є критично важливим для її подальшої переробки на волокно.

А. М. Шувар і Р. М. Войтович [3] проаналізували методи збирання льону олійного в умовах Західної України. Вони дійшли висновку, що використання роздільного методу збирання, який передбачає застосування косарки Z-169 із подальшим підбором валків за допомогою комбайна СК-5М «Нива», є доцільним, особливо за несприятливих погодних умов. Такий підхід забезпечує урожайність насіння на рівні 0,57–0,71 т/га, одночасно зберігаючи якість стеблової маси для подальшої переробки.

С. В. Ягелюк, Дідух В. Ф., Кірчук Р. В. [4] вивчали потенціал використання стеблової частини врожаю льону олійного, вирощеного в умовах Західного Полісся. Вони розробили технологічний підхід, який враховує стадію зрілості культури та кліматичні умови, що впливають на методику збирання. Дослідники пропонують переробку стебел у тресту або біопаливо, що дозволяє ефективно використовувати всю рослину та мінімізувати екологічний вплив.

Сучасні дослідження підтверджують необхідність удосконалення методів збирання та переробки льону олійного, щоб максимально ефективно використовувати його стеблову частину для отримання якісного волокна. Подальший розвиток технологій у цій галузі сприятиме впровадженню безвідходних виробничих процесів та підвищенню економічної рентабельності вирощування культури.

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження – обґрунтувати та визначити оптимальні вимоги до збирання льону олійного для подальшої переробки на волокно, з урахуванням агротехнічних, технологічних та економічних аспектів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Процес збирання льону олійного, призначеного для подальшої переробки на волокно, є критичним етапом у формуванні високоякісної сировини, що використовується в текстильній та нетканій промисловості [5, 6]. Від ефективності цього процесу залежать якісні характеристики волокна, а також загальна продуктивність

виробництва. Важливу роль відіграють агротехнічні, технологічні та економічні фактори, що визначають оптимальні терміни та методи збору.

Агротехнічні умови характеризуються оптимальними строками збирання та впливом кліматичних умов.

Оптимальні строки збирання – досягнення технічної стиглості льоном олійним відбувається в середньому через 80–100 днів після висіву. Найкращим періодом для збору вважається жовта або повна стиглість, коли насіння вже визріло, а стебла ще зберігають достатню міцність, що є важливим для подальшої переробки.

Вплив кліматичних умов характеризується надлишковою вологістю у період збору, яка може негативно впливати на якість волокна, сприяючи розвитку грибкових уражень; посушливий період може призводити до ламкості стебел, що підвищує втрати врожаю.

Доцільною є оптимізація строків збирання льону олійного для різних кліматичних зон. Дослідження впливу мікроклімату на формування якісних характеристик волокна. Використання нових сортів льону з покращеними агрономічними властивостями.

Технологічні фактори, які впливають на збирання льону олійного характеризуються методами збирання:

– роздільний метод із використанням спеціалізованих косарок дає змогу зменшити механічні пошкодження стебел та покращити дозрівання насіння;

– пряме комбайнування можливе лише за умови рівномірного дозрівання, проте воно збільшує ризик пошкодження стебел, що може вплинути на якість волокна;

– застосування десикації (наприклад, препаратами Реглон Супер або Раундап) сприяє швидкому та рівномірному дозріванню рослин, що допомагає знизити втрати врожаю.

Також до технологічних факторів слід віднести обробку після збирання, яка впливає на збереження якості сировини важливе правильне сушіння та контрольоване зберігання, що запобігає розвитку цвілі та втраті корисних властивостей стебел. Додаткові технологічні процеси, такі як тіпання або котонізація, дозволяють покращити подальше використання волокна у виробництві.

Оптимізувати процес збору льону олійного із врахуванням технологічних факторів можливо за рахунок розробки інноваційних методів механізованого збирання, що мінімізують пошкодження волокна, використання сучасних технологій післязбиральної обробки для покращення якості сировини та впровадження автоматизованих систем контролю вологості та рівня стиглості льону.

До екологічних факторів слід віднести мінімізацію втрат врожаю завдяки впровадженню сучасних технологій збору сприяє скороченню втрат врожаю на 10–15 %, що позитивно впливає на загальну рентабельність виробництва; використання механізованих методів збору знижує потребу в ручній праці, що дозволяє підвищити продуктивність і скоротити виробничі витрати.

Із врахуванням екологічних факторів доцільними є дослідження екологічно безпечних методів десикації та їх впливу на навколишнє середовище, визначення оптимальних методів утилізації відходів після збору льону, використання природних стимуляторів росту для підвищення стійкості рослин до кліматичних змін.

До економічних факторів відноситься підвищення якості та конкурентоспроможності волокна, оскільки високоякісне волокно льону олійного відповідає стандартам текстильної промисловості, що робить його конкурентоспроможним як на внутрішньому, так і на міжнародному ринку, а використання сучасних технологій первинної переробки розширює можливості реалізації продукції та сприяє розвитку галузі.

В цьому напрямку ефективним є аналіз економічної доцільності застосування сучасних технологій збору та переробки льону, дослідження можливостей диверсифікації використання льоноволокна в нових галузях промисловості, оцінка впливу міжнародних тенденцій на розвиток ринку льоноволокна та формування експортної стратегії.

Таким чином, ефективне управління процесом збирання льону олійного з урахуванням агротехнічних, технологічних, екологічних та економічних факторів дозволяє покращити якість сировини, знизити виробничі втрати та підвищити прибутковість галузі.

Розвиток цих напрямків сприятиме підвищенню ефективності вирощування та переробки льону олійного, зменшенню втрат виробництва та забезпеченню конкурентоспроможності галузі на світовому ринку.

Висновки

Льон олійний є перспективною сировиною для виробництва волокна в Україні, адже він володіє значним економічним, аграрним і екологічним потенціалом. Використання стеблової маси цієї культури сприяє підвищенню її рентабельності, збереженню ресурсів та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище.

Аналіз сучасних наукових досліджень підтверджує необхідність удосконалення технологій збирання та первинної переробки льону олійного. Зокрема, впровадження десикації, оптимізація методів збору врожаю та активне використання механізованих систем здатні покращити якісні характеристики волокна та скоротити виробничі втрати.

Важливу роль у вдосконаленні процесів збору і переробки льону олійного відіграють агротехнічні, технологічні, екологічні та економічні чинники. Інноваційні технології, сучасні методи післязбиральної обробки та

автоматизовані системи контролю сприятимуть отриманню високоякісного волокна та підвищенню конкурентоспроможності української продукції на міжнародному ринку.

Подальші дослідження мають бути зосереджені на розробці вдосконалених методів механізованого збору, аналізі екологічно безпечних технологій обробки, а також впровадженні економічно доцільних рішень у сфері переробки льоноволокна. Таким чином, розвиток цієї галузі забезпечить ефективне використання льону олійного, сприятиме впровадженню безвідходного виробництва та підвищенню економічної рентабельності сільськогосподарських підприємств.

Список використаної літератури

1. Рудік О. Агроекологічне обґрунтування і розробка базисних елементів технології вирощування льону олійного подвійного використання в умовах півдня України: дис.... д-ра с.-г. наук. Херсон, 2019. 504 с.

2. Вожегова Р.А., Рудік О.Л. Енергетичний аналіз технологій вирощування льону олійного в умовах Півдня України за різних схем використання продукції // Зрошуване землеробство. 2018. Вип. 70. С. 64–68.

3. Шувар А.М., Войтович Р.М. Оцінка способів збирання льону олійного // Науково-технічний бюлетень Інституту олійних культур НААН. 2012. № 17. С. 149–153.

4. Ягелюк С., Дідух В., Кірчук Р. Дослідження процесів збирання льону олійного з використанням стеблової частини врожаю // Коммодіті Буллетін. 2019. Т. 12, № 1. С. 282–285.

5. Фурса О., Архип А., Євтушенко В. Придатність соломи льону олійного для переробки на волокно // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2024. Т. 331, № 1. С. 343–346.

6. Клевцов К.М., Соболєв О.А., Князєв О.В. Дослідження впливу способу збирання льоносоломи на вихід лубу зі стебел льону олійного // Легка промисловість. 2010. № 4. С. 29–31.

References

1. Rudik, O. (2019). *Agroecological justification and development of basic elements of the technology for growing dual-use oil flax in the conditions of southern Ukraine* (Doctoral dissertation). Kherson, Ukraine.

2. Vozhegova, R.A., & Rudik, O.L. (2018). Energy analysis of oil flax cultivation technologies in the South of Ukraine under different product use schemes. *Irrigated Agriculture, (70)*, 64–68.

3. Shuvar, A.M., & Voitovych, R.M. (2012). Evaluation of oil flax harvesting methods. *Scientific and T echnical Bulletin of the Institute of Oilseed Crops of NAAS*, *(17)*, 149–153.

4. Yaheliuk, S., Didukh, V., & Kirchuk, R. (2019). Research on oil flax harvesting processes using the stem part of the crop. *Commodity Bulletin, 2*(1), 282–285.

5. Fursa, O., Arkhyp, A., & Yevtushenko, V. (2024). Suitability of oil flax straw for fiber processing. *Bulletin of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 331*(1), 343–346.

6. Klevtsov, K.M., Soboliev, O.A., & Kniaziev, O.V. (2010). Study of the effect of flax straw harvesting methods on fiber yield from oil flax stems. *Light Industry*, *(4)*, 29–31.

УДК 677.027.67 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.45

С. М. КОБ'ЯКОВ
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри товарознавства, стандартизації та сертифікації
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-2811-7572

А. Ю. ЛИСИХ
кандидат технічних наук,
старший викладач кафедри енергетичне машинобудування
Первомайський навчально-науковий інститут
Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0002-0979-7736

ОБРОБКА ТЕКСТИЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ ПОКРИВНОЮ КОМПОЗИЦІЄЮ

У статті досліджуються технологічні параметри процесу обробки текстилю поліакрилатними дисперсіями з метою визначення оптимального складу дисперсії, що забезпечить високий гідрофобний ефект та задовільні фізико-механічні показники тканини.

Мета дослідження полягає у розробці нової композиції, для обробки текстильного матеріалу, що забезпечує йому водо- та брудовідштовхувальні властивості. Вирішальною характеристикою довговічності білизняних тканин є стійкість матеріалів до тертя і багаторазового прання. Тертя текстильних матеріалів супроводжується зменшенням маси виробу і охоплює процес зачеплення нерівностей, їх зрізання, розхитування структури і як наслідок – повне руйнування матеріалу. Гладкі, м'які і пружно-еластичні текстильні матеріали є більш стійкими до тертя, ніж жорсткі, тверді і нерівні. Значний вплив на зносостійкість текстильних матеріалів поряд з іншими здійснюють обробні операції. Плівки, що утворюються на поверхні волокон під час обробки, склеюють окремі волокна в пряжі і запобігають їх випаданню, підвищуючи зносостійкість тканин.

Експериментально визначали, співвідношення покривної композиції, її витрати та температуру обробки на гідрофобний ефект. Для визначення оптимальної температури процесу досліджували сорбцію препарату за різних температур. Як свідчать результати, за температури 40 °С сорбція композиції з ванни найнижча; у випадку температури 60 °С максимальне значення сорбції досягається занадто швидко – за 1 годину, що може призвести до нерівномірності розподілу акрилату, і як свідчать результати після висушення матеріалу, низької адгезії плівки до основи. Оптимальною температурою процесу визначено 45–55 °С.

Результатом проведеного дослідження стало визначення впливу покривної обробки поверхні на гідрофобний ефект текстильного матеріалу та фізико-механічні показники текстилю після гідрофобізації.

Отримані результати демонструють, що оптимальний гідрофобний ефект досягається при використанні лакрилу в кількості 15–20 %.

Після проведеної обробки тканини набувають покращених фізико-механічних характеристик: без зменшення міцності на розрив, збільшується стійкість до багаторазового згинання, знижується ступінь усадки під час кип'ятіння.

Ключові слова: *нейтрон дисперсії, акрилові полімери, гідрофобна обробка, водовідштовхувальний ефект, полімерні композиції.*

S. M. KOBYAKOV
Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Commodity Science,
Standardization and Certification
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-2811-7572

A. YU. LYSYKH
Candidate of Technical Sciences,
Senior Lecturer at the Department of Energy Engineering
Pervomaisky Educational and Scientific Institute
of National University of Shipbuilding named after Admiral Makarov
ORCID: 0000-0002-0979-7736

TREATMENT OF TEXTILE MATERIAL WITH COATING COMPOSITION

The article investigates the technological parameters of the process of processing textiles with polyacrylate dispersions in order to determine the optimal composition of the dispersion, which will provide a high hydrophobic effect and satisfactory physical and mechanical performance of the fabric.

The purpose of the study is to develop a new composition for processing textile material, which provides it with water and dirt-repellent properties. The decisive characteristic of the durability of linen fabrics is the resistance of materials to friction and repeated washing. Friction of textile materials is accompanied by a decrease in the mass of the product and includes the process of engaging irregularities, their cutting, loosening of the structure and, as a result, complete destruction of the material. Smooth, soft and elastic textile materials are more resistant to friction than rigid, hard and uneven ones. A significant impact on the wear resistance of textile materials, along with others, is exerted by processing operations. Films formed on the surface of fibers during processing glue individual fibers in the yarn and prevent their loss, increasing the wear resistance of fabrics.

The ratio of the coating composition, its consumption and the treatment temperature for the hydrophobic effect were experimentally determined. To determine the optimal process temperature, the sorption of the drug at different temperatures was studied. As the results show, at a temperature of 40 °C, the sorption of the composition from the bath is the lowest; in the case of a temperature of 60 °C, the maximum sorption value is reached too quickly – in 1 hour, which can lead to uneven distribution of the acrylate, and as the results show after drying the material, low adhesion of the film to the base. The optimal process temperature was determined to be 45–55 °C.

The result of the study was to determine the influence of the coating surface treatment on the hydrophobic effect of the textile material and the physical and mechanical indicators of the textile after hydrophobization.

The results obtained demonstrate that the optimal hydrophobic effect is achieved when using lacryl in an amount of 15–20 %.

After the treatment, the fabrics acquire improved physical and mechanical characteristics: without reducing the tensile strength, resistance to repeated bending increases, and the degree of shrinkage during boiling decreases.

Key words: *neutron dispersion, acrylic polymers, hydrophobic treatment, water repellent effect, polymer compositions.*

Постановка проблеми

Попередні дослідження показали, що плівки одержані з композиції рівної кількості дисперсії та лакрилу не забезпечують рівномірність покриття.

Використання температури ванни 100 °С та вище призводить до випаровування окремих складових плівки, що в подальшому негативно відобразиться на якості покриття. Витрати композиції 25 % та вище призводить до значного утяжиління тканини, також надалі слід очікувати погіршення гігієнічних властивостей покриття, зокрема, паропроникності та повітропроникності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Матеріали, які піддаються частому пранню зношуються не стільки в процесі експлуатації, як руйнуються самим пранням, під комплексною дією фізико-хімічних і механічних факторів. Деякі автори вважають, що під час прання 4/5 зношування припадає на механічні пошкодження матеріалів і лише 1/5 – на хімічні. За відомостями авторів зношування тканин з целюлозних волокон внаслідок хімічних пошкоджень під час першого прання є незначним і становить не більше 2 %, а після 50-го прання – до 25 % [1].

Для надання вогнезахисних властивостей горючим натуральним (бавовна, льон) і хімічним волокнам (віскозне, поліакрилонітририльне та ін.) їх обробляють різними хімічними препаратами (антипіренами). Це в основному солі і оксиди ряду металів, галогено- і фосфоровмісні органічні сполуки.

Споживач у процесі експлуатації виробу найбільшу увагу приділяє стійкості забарвлення до дії фізико-хімічних (світла, підвищеної температури) та механічних факторів (сухе та мокре тертя, розривні характеристики, багаторазове прання). Під дією цих факторів відбуваються фізико-хімічні зміни у структурі барвника і порушення міцності їх зв'язків з волокнами, що призводить до незворотних змін кольору матеріалів. Передбачається обробка текстильного матеріалу покривною композицією [2].

Популярні типи обробок тканин:

1. Водовідштовхувальна обробка. Вона є ефективним способом захисту тканин від впливу вологи. Цей метод дозволяє тканині залишатися сухою та зберігати свою структуру, не вбираючи воду. Конкретних фізичних показників витривалості від непромокання немає [3].
2. Водотривка обробка. Водотривка обробка відрізняється тим, що витримує визначений стовпчик води, має конкретні показники витривалості. Часто використовується для пошиття предметів одягу для активного відпочинку.
3. Масловідштовхувальна обробка. Цей метод забезпечує відштовхування мастил та інших жирних речовин, підвищуючи тим самим тривалість та ефективність використання тканин. Такі тканини найчастіше призначені для пошиття робочого одягу спеціалістам промислових структур.
4. Акрилова обробка. Покриття акрилом надає тканині додатковий захист від ультрафіолетового випромінювання та забезпечує стійкість до вигорання. Цей метод часто використовується для захисту від сонця та забезпечення тривалого збереження кольору полотен, що найчастіше використовуються для пошиття скатертин [4].

Формулювання мети дослідження

Мета дослідження полягає у розробці нової композиції, для обробки текстильного матеріалу, що забезпечує йому водо- та брудовідштовхувальні властивості. Здійснення цього передбачається за рахунок застосування перспективної технології обробки матеріалів, яка б дозволяла не тільки надавати їм комплексу необхідних споживних властивостей, а й зводити до мінімуму притаманні їм недоліки, а також продовжувати терміни експлуатації виробів з цих матеріалів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Тривала дія фізико-хімічних факторів зношування призводить до помітного погіршення фізико-механічних властивостей матеріалів, яке називають старінням, що пов'язане з хімічними перетвореннями молекулярних ланцюгів, і перш за все з деструкцією і змиванням макромолекул.

Деструкція полімерів волокон представляє собою руйнування макромолекул і міжмолекулярних зв'язків під дією різних зовнішніх факторів.

Процес старіння під впливом фізико-хімічних факторів проходить переважно на поверхні волокон. В результаті деструкції зменшується орієнтація молекул, на поверхні волокон утворюються розриви, тріщини, які полегшують доступ вологи і кисню в глибину волокон, в проміжки між фібрилами. Зміна молекулярної структури волокон призводить до зменшення їхньої міцності і збільшення жорсткості при згині.

Крім загальної вимоги до текстильних матеріалів – зносостійкості, до них пред'являються додатково спеціальні вимоги, що враховують конкретне призначення матеріалу: для одягу – формостійкість; для постільної білизни – гідрофільність; для плащових матеріалів – водовідштовхування; для спецодягу – масловідштовхування, знижена горючість; для наметових тканин – гідро- і біостійкість. Всі ці та інші властивості текстильних матеріалів додаються за допомогою спеціальних препаратів – апретів. Присутність апретуючого препарату на текстильному матеріалі в кількості від 1 до 5 % від маси матеріалу надає йому цілком специфічні властивості: гідрофільні препарати забезпечують гідрофільність, гідрофобні та олеофобні препарати – гідрофобність та олеофобність, біоцидні препарати – біологічну стійкість і біоактивність (аж до лікувальних властивостей), антипірени – вогнезахисної і т.д. Іншими словами, апрет, що знаходиться на текстильному матеріалі у відносно невеликій кількості, переносить свої властивості на всю масу, на весь обсяг, на всю поверхню матеріалу [5].

Обробка тканин – це важливий етап в їхньому виробництві, що дозволяє поліпшити властивості та розширює області використання. Від водовідштовхування до антиінфрачервоної обробки кожен метод вносить свій внесок у підвищення якості та функціональності тканин, що робить їх більш універсальними та довговічними.

Експериментально визначали, співвідношення покривної композиції, її витрати та температуру обробки на гідрофобний ефект.

Були обрані наступні технологічні параметри:

– співвідношення акрилової дисперсії: лакрилу: 1:1,5; 1:2; 1:2,5;
– витрати препарату: 15–20 % від маси тканини;
– температура ванни: 40–75 °С.

Для подальших досліджень було обрано наступні варіанти обробки (таблиця 1).

Таблиця 1

Варіанти обробки

№ п/п	Співвідношення дисперсія-лакрил, %	Витрати композиції, %	Температура обробки, °С
1	1:1,5	15	40–75
2	1:1,5	20	40–75
3	1:2	15	40–75
4	1:2	20	40–75
5	1:2,5	15	40–75
6	1:2.5	20	40–75

Для визначення оптимальної температури процесу досліджували сорбцію препарату за різних температур. Результати досліджень представлені на рисунку 1.

Як показали результати досліджень, при температурі 40 °С спостерігається найнижчий рівень сорбції композиції з ванни. Підвищення температури до 60 °С призводить до надто швидкого досягнення максимального значення сорбції вже за 1 годину, що може спричинити нерівномірний розподіл акрилату по поверхні матеріалу. Це, у свою чергу, негативно впливає на адгезію плівки до основи після висушування. Таким чином, оптимальним температурним діапазоном для процесу було визначено 45–55 °С.

Вплив покривної обробки поверхні на гідрофобний ефект текстильного матеріалу.

Якість досліджуваних зразків оцінювали за показниками водопоглинання, водотривкості та водовідштовхування (таблиця 2).

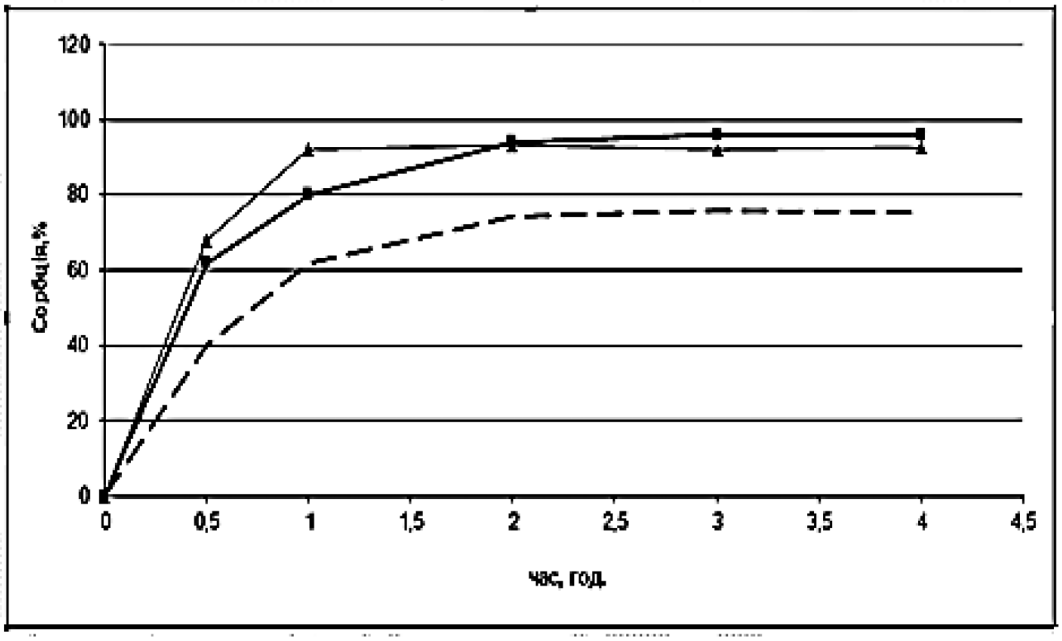


Рис. 1. Кінетика сорбції акрилової композиції за різних температур: — — — 40 °С; — — 50 °С; — — 60 °С

Таблиця 2

Результати обробки тканини

Показники	Варіант обробки					
	1	2	3	4	5	6
Капілярність через 30 і 60 хв.	140/170	180/210	140/160	100/130	40/80	60/100
Водопоглинання, %	42	45	46	53	50	52
Водовідштовхування, у.о.	75	75	70	70	55	60
Водотривкість, мм.вод.ст.	280	280	280	260	180	250

Аналіз взаємозв'язку між кількістю нанесеного препарату та отриманим гідрофобним ефектом дозволяє зробити висновок, що зі збільшенням кількості зафіксованого поліакрилату зростає і гідрофобний ефект. Підвищення температури процесу сприяє очищенню поверхні та пор волокнистого матеріалу від домішок, зниженню внутрішнього напруження, що запобігає появі нерівномірних властивостей, а також забезпечує краще проникнення реагентів у структуру волокна та підвищує адгезію покриття до основи.

Застосування різних методів оцінки гідрофобності тканини, таких як водопоглинання, водовідштовхування та водотривкість, не дає можливості однозначно визначити оптимальний ступінь підготовки матеріалу для надання йому високих гідрофобних властивостей. Аналіз отриманих результатів свідчить, що для досягнення необхідного ефекту, який оцінюється за показником водовідштовхування, найбільш доцільним є використання варіантів обробки 1 і 2. Водночас, згідно з технічними вимогами до тканини «нейтрон», гідрофобний ефект оцінюється за показником водотривкості, який виявляється найкращим у варіантах 1, 2 і 3.

Підвищенню водотривкості сприяє збільшення концентрації гідрофобізатора та покращення сорбції препарату, проте ефективність цих факторів різниться. Зокрема, збільшення концентрації гідрофобізатора дає більш виражений результат у порівнянні з покращенням сорбції препарату. Температура також впливає на процес, але цей вплив є значущим лише при виході за межі визначеного інтервалу параметрів.

Оцінка фізико-механічних показників текстилю після гідрофобізації

Важливо, щоб процес надання тканині гідрофобних властивостей не призводив до погіршення інших фізичних, гігієнічних та експлуатаційних характеристик матеріалу. У рамках дослідження було проаналізовано зміну міцності тканини «нейтрон», а також визначено такі фізичні показники, як повітропроникність, жорсткість та здатність до зминання. Результати зміни розривного навантаження наведено у таблиці 3.

Аналіз даних, представлених у таблиці 3, які відображають зміну розривного навантаження тканини після різних стадій підготовки, свідчить, що зниження цього показника не зафіксовано. Навпаки, у тканинах, що пройшли водовідштовхувальну обробку, спостерігається підвищення міцності.

Разом із цим відзначається незначне збільшення загальної міцності тканини, підвищення стійкості до багаторазового згинання та зменшення усадки при кип'ятінні.

Таблиця 3

Зміна розривного навантаження

№ п/п	Розривне навантаження, Н	
	Основа	Уток
Контрольний зразок, без обробки	453	508
1	465	680
2	480	686
3	475	654
4	481	679
5	464	649
6	479	658

Таблиця 4

Фізичні та гігієнічні характеристики текстильних матеріалі

№ п/п	Жорсткість, сН	Повітряпроникність, $см^3/см^2$	Ступінь усадки, %	Стирання, 10^3 вигинів
Контрольний зразок, без обробки	25	1130	4	70
1	30	1016	3	75
2	32	1010	2,8	79
3	28	1150	3	84
4	28	1140	2,5	79
5	27	1120	2,8	85
6	26	1130	3,2	80

Фізичні та гігієнічні характеристики текстильних матеріалів наведено у таблиці 4.

Результати, наведені в таблиці 4, свідчать, що після обробки тканин їхні гігієнічні властивості, зокрема паропроникність і жорсткість, залишаються без суттєвих змін. Це можна пояснити наявністю в полімерних структурах систем субмікроскопічних пор, капілярів, а також порожнин і тріщин. Саме ці утворення не лише забезпечують сорбційні й адгезивні характеристики матеріалу, але й сприяють збереженню його проникності до основи.

Під час експлуатації виробів тканини піддаються багаторазовим пранням. Отримані результати дають змогу оцінити вплив прання на змінювання тканини, що відображено на рисунку 2.

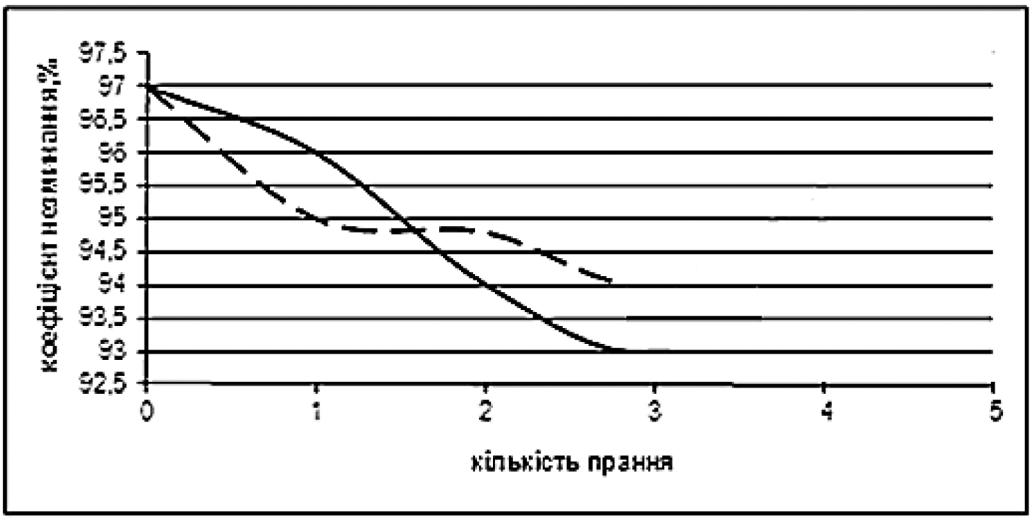


Рис. 2. Залежність коефіцієнту незминання тканини від кількості прання: № 1 – ——— зразок оброблений гідрофобізатором; № 2 — — — — контрольний зразок без обробки

Результати вказують, що обробка тканин мало впливає на зміну показника зминання. Порівняння проводили з контрольним зразком № 2 без обробки і з зразком № 1 з найбільшою витратою композиції.

Висновки

У результаті проведеного дослідження було вивчено вплив покривної обробки тканин із штучних волокон за допомогою нейтронних дисперсій акрилових полімерів на гідрофобні властивості матеріалу та його фізико-механічні характеристики. Встановлено, що для досягнення високих водовідштовхувальних властивостей необхідно

витримувати тканину в полімерній композиції протягом 2 годин при температурі 45–55 °С, після чого проводити сушіння матеріалу упродовж 2–3 годин.

Отримані результати демонструють, що оптимальний гідрофобний ефект досягається при використанні лакрилу в кількості 15–20 %.

Після проведеної обробки тканини набувають покращених фізико-механічних характеристик: без зменшення міцності на розрив, збільшується стійкість до багаторазового згинання, знижується ступінь усадки під час кип'ятіння. Водночас гігієнічні властивості, зокрема паропроникність і жорсткість, залишаються на початковому рівні.

Результати дослідження також свідчать про те, що гідрофобна обробка сприяє зниженню зминання тканини. Хоча цей ефект незначний і становить 1–2 % за результатами визначення коефіцієнта незминання після стандартного третього прання.

Список використаної літератури

1. Дрегуляс Е. П., Рибальченко В. В. Використання новітніх технологій у виготовленні текстилю для одягу. *Легка промисловість*. 2009. № 4. С. 5–11.

2. Галик І. С., Концевич О. Б., Семак Б. Д. Екологічна безпека та біостійкість текстильних матеріалів : монографія. Львів : Львів комерц. акад., 2006. 232 с.

3. Водовідштовхувальні тканини: особливості та характеристика. URL: https://metrtkani.com/ua/a321429-vodoottalkivayuschie-tkani-osobennosti.html? srsltid=AfmBOopBHKFVZFb9GvcxwK-IiDs_UCeaHxOW8oUJC97FkObez 28Hn2z- (дата звернення: 12.02.2025).

4. Спеціальні види обробки тканин. URL: https://studfile.net/preview/7655535/page:2/ (дата звернення: 12.02.2025).

5. Супрун Н. П., Орленко Л. В., Дрегуляс Е. П. Конфекціювання матеріалів для одягу : навч. посіб. Київ, 2007. 246 с.

References

1. Drehulias E. P., Rybalchenko V. V. (2009). Vykorystannia novitnikh tekhnolohii u vyhotovlenni tekstyliu dlia odiahu. [Using the latest technologies in the production of textiles for clothing]. *Lehka promyslovist*, no. 4, pp. 5–11.

2. Halyk I. S., Kontsevych O. B., Semak B. D. (2006). *Ekolohichna bezpeka ta biostiikist tekstylnykh materialiv : monohrafiia*. [Ecological safety and biostability of textile materials: monograph]. Lviv : Lviv komerts. akad.

3. Vodovidshtovkhuvalni tkanyny: osoblyvosti ta kharakterystyka. [Water-repellent fabrics: features and characteristics]. Retrieved from: https://metrtkani.com/ua/a321429-vodoottalkivayuschie-tkani-osobennosti.html? srsltid=AfmBOopBHKFVZFb9GvcxwK-IiDs_UCeaHxOW8oUJC97FkObez 28Hn2z- (data zvernennia: 12.02.2025).

4. Spetsialni vydy obrobky tkanyn. [Special types of fabric processing]. Retrieved from: https://studfile.net/preview/7655535/page:2/ (data zvernennia: 12.02.2025).

5. Suprun N. P., Orlenko L. V., Drehulias E. P. (2007). *Konfektsiiuvannia materialiv dlia odiahu* [Fabrication of clothing materials]. Kyiv.

УДК 547.922.5 + 532.783 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.46

В. В. ЛИСТВАН
кандидат хімічних наук, доцент,
доцент кафедри хімії
Житомирський державний університет імені Івана Франка
ORCID: 0000-0002-8366-2813

ДІАРИЛЕТИЛЕНИ ЯК ОРГАНІЧНІ ЛЮМІНОФОРИ: ПРОСТИЙ СИНТЕЗ ЗА РЕАКЦІЄЮ ВІТТІГА

Органічні люмінофори широко застосовуються у різних галузях техніки, у промисловості, медицині, наукових дослідженнях тощо. Тому пошук нових сполук з відповідними властивостями, як і розробка чи вдосконалення методів синтезу уже відомих класів речовин з люмінесцентними властивостями залишаються актуальними.

Важливу групу органічних люмінофорів становлять, зокрема, діарилетилени. Їх синтез, однак, часто пов'язаний із застосуванням складних багатостадійних методів, а також дорогих реагентів, що негативно позначається на економічній доцільності їх використання. Тому важливим завданням є пошук простих і доступних методів отримання сполук даного класу.

До порівняно простих методів отримання 1,2-діарилзаміщених похідних етену з утворенням подвійного зв'язку C═C *належить, зокрема, реакція Віттіга – взаємодія між алкіліденфосфоранами (фосфорілідами) та альдегідами. Недоліком даного методу однак є нестабільність багатьох алкіліденфосфоранів, деякі з яких взагалі не можуть бути виділені в індивідуальному стані.*

Метою даної роботи є розробка максимально простого методу синтезу діарилетиленів за реакцією Віттіга на основі фосфонієвих солей, що не передбачає виділення в індивідуальному стані проміжних продуктів – ілідів фосфору.

У роботі досліджена взаємодія між фосфонієвими солями бензильного типу та ароматичними альдегідами в однофазній та двофазній системі із застосуванням триетиламіну чи водного NaOH *в ролі основи. Метод виключає необхідність виділення та очищення проміжного продукту – фосфорілідy, що дуже спрощує процедуру синтезу.*

Застосування розробленого методу дозволило отримати низку нових 1,2-діарилетиленів, зокрема таких, що містять фрагмент бензофенону, а також сполук, що містять конденсовані ароматичні системи, зокрема нафталену і антрацену.

Розчини усіх отриманих речовин демонструють виражену синю флюоресценцію при опроміненні УФ-світлом, що підтверджує перспективність їх подальшого вивчення у даному напрямку.

Ключові слова: *люмінофор, діарилетилени, фосфонієві солі, іліди фосфору, реакція Віттіга.*

V. V. LYSTVAN
Ph.D. in Chemistry, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemistry
Zhytomyr Ivan Franko State University
ORCID: 0000-0002-8366-2813

DIARYL ETHYLENES AS ORGANIC LUMINOPHORES: SIMPLY SYNTHESIS VIA WITTIG REACTION

Organic luminophores are widely applied in various fields of technology, industry, medicine, scientific research, etc. Therefore, the search for new compounds with appropriate properties, as well as the development or improvement of methods for synthesising already known classes of substances with luminescent properties remains relevant. Diarylethylenes are one of the important groups of organic luminophores. However, their synthesis often requires the application of complex, multi-stage methods and expensive reagents, which negatively affects the economic feasibility of their application. Therefore, developing simple and affordable methods for obtaining this class of compounds is an important task for chemists and technologists.

Among the relatively simple methods for obtaining 1,2-diaryl-substituted ethene derivatives with the formation of a C═C *double bond, the Wittig reaction – an interaction between alkylidenephosphoranes (phosphorus ylides) and aldehydes – can be specifically mentioned. The disadvantage of this method, however, is the instability of many alkylidenephosphoranes, some of which cannot be isolated in the pure state at all.*

The aim of this work is to develop the simplest possible method for the synthesis of diarylethylenes by the Wittig reaction based on phosphonium salts, which does not involve the isolation of intermediate products – phosphorus ylides in the pure state. An interaction between benzylic phosphonium salts and aromatic aldehydes in a single-phase or two-phase system using triethylamine or aqueous NaOH *as a base has been investigated. The method eliminates the necessity for isolating and purifying the intermediate product – phosphorylide – which significantly simplifies the synthesis procedure.*

The application of the developed method allowed the synthesis of a number of new 1,2-diarylethylenes, particularly those containing a benzophenone fragment, as well as compounds containing condensed aromatic systems such as naphthalene and anthracene. Solutions of all obtained substances demonstrate strong blue fluorescence when irradiated with UV light, confirming the potential for their further investigation in this direction.

Key words: *luminophore, diarylethylenes, phosphonium salts, phosphorus ylides, Wittig reaction.*

Постановка проблеми

Органічні люмінофори посіли вагоме місце серед сучасних технологій. Вони використовуються не лише у різних галузях техніки (електроніка, дефектоскопія, виробництво полімерних матеріалів), але і в хімічному аналізі, медицині, біологічних дослідженнях тощо. Тому актуальним залишається пошук нових сполук з відповідними властивостями, як і розробка чи вдосконалення методів синтезу уже відомих класів люмінофорів.

Відомо, що люмінесцентні чи флуоресцентні властивості притаманні, зокрема, речовинам, для будови яких характерна наявність достатньо протяжної чи розгалуженої системи π-зв'язків, зокрема, ароматичних карбо- або гетероциклів, сполучених ненасиченим аліфатичним фрагментом, з яким вони перебувають у спряженні. До сполук такого типу належать, зокрема, діарилетилени і діарилацетилени. Речовини цих класів давно відомі своїми люмінесцентними та іншими практично цінними оптичними властивостями [1, 2], останніми роками їх також почали активно застосовувати у ролі молекулярних фотоперемикачів [3]. Їх синтез, однак, часто пов'язаний із застосуванням складних багатостадійних методів, що негативно позначається на економічній доцільності їх використання. Таким чином, пошук простих і доступних методів отримання діарилетиленів залишається актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогодні відомо досить багато методів, що можуть бути використані для синтезу діарилетиленів з різними ароматичними системами, у тому числі поліциклічними, гетероциклічними тощо [4]. Наприклад, для отримання стильбену можна застосувати відновлення бензоїну амальгамою цинку. Реакцією арилдибромоетанів, наприклад, з біфенілом у присутності титан хлориду можна отримувати галогеновмісні діарилетени. Заміщені похідні бензилброміду під дією літій диізопропіламіду утворюють відповідні заміщені транс-стильбени [5]. Складні дигетароїлетени – похідні перфлуороциклопентену були отримані дією на відповідні галогенопохідні бутиллітію у тетрагідрофурані [6]. X. Shen зі співавторами [7] запропонували метод одноколбового синтезу 1,2-діарилетиленів взаємодією бензилгалогенідів і тозилгідразиду з ароматичними альдегідами на паладієвому каталізаторі.

У всіх перелічених публікаціях звертає на себе увагу необхідність застосування досить складних методик, що передбачають використання або дорогих каталізаторів (паладій), або металоорганічних реагентів, що у свою чергу вимагають специфічних умов (інертна атмосфера, ідеально сухі розчинники тощо.)

До порівняно простих методів отримання 1,2-діарилзаміщених похідних етену з утворенням подвійного зв'язку C═C належить, зокрема, реакція Віттіга – взаємодія між алкіліденфосфоранами (фосфорілідами) та альдегідами [8]. Метод передбачає попереднє отримання ілідів фосфору дією сильних основ (алкоголяти, фенільні та алкільні похідні літію) на відповідні фосфонієві солі, що утворюються, в свою чергу, взаємодією галогенметиларенів з трифенілфосфіном. Отримані іліди взаємодіють з ароматичними альдегідами, утворюючи 1,2-діарильні похідні етену. Загальна схема перетворень при цьому така:

$$(C_6H_5)_3P + Ar — CH_2Br \rightarrow (C_6H_5)_3\overset{+}{P}—CH_2ArBr^- \xrightarrow[(-HBr)]{C_2H_5ONa} (C_6H_5)_3{=}CHAr \xrightarrow{Ar—CHO} Ar—CH{=}CH—Ar + Ph_3PO$$

Наведений метод порівняно простий, однак його недоліком, окрім застосування сильних основ, є нестабільність багатьох алкіліденфосфоранів, деякі з яких взагалі не можуть бути виділені в індивідуальному стані.

Формулювання мети дослідження

Метою даної роботи є розробка максимально простого методу синтезу діарилетиленів за реакцією Віттіга на основі фосфонієвих солей, що не передбачає виділення в індивідуальному стан проміжних продуктів – алкіліденфосфоранів.

Викладення основного матеріалу дослідження

Нами була досліджена взаємодія між фосфонієвими солями бензильного типу та ароматичними альдегідами в однофазній та двофазній системі. При цьому в ролі основ для зв'язування гідрогенгалогенідів при перетворенні фосфонієвої солі в алкіліденфосфоран використовувались триетиламін (однофазна) чи водний розчин NaOH (двофазна система). Продукт взаємодії фосфонієвої солі з основою – ілід фосфору – в момент утворення відразу вступає в реакцію Віттіга з наявним у реакційній суміші альдегідом, утворюючи діарильну заміщену похідну етену. При цьому відпадає необхідність у виділенні та очищенні проміжного продукту – фосфоріліду, що дуже спрощує процедуру синтезу. Метод дозволив отримувати, зокрема, нові похідні конденсованих ароматичних вуглеводнів – нафталену і антрацену, наявність складної системи спряжених π-зв'язків у яких значно підвищує імовірність флуоресцентних властивостей отриманих сполук.

Необхідні для синтезу фосфонієві солі ми отримували на основі бензильних галогенопохідних, які, в свою чергу, утворювались або хлорометилюванням ароматичних вуглеводнів за Фріделем-Крафтсом, або шляхом бромування метиларенів дією бромосукциніміду. Взаємодія отриманих галогенопохідних з трифенілфосфіном при нагріванні у ксилені чи толуені призводила до утворення відповідних фосфонієвих солей:

$$ArCH_2Hal + Ph_3P \rightarrow ArCH_2P + Ph_3Hal^-$$

Отримані фосфонієві солі використовували для синтезу діарилетиленів за реакцією Віттіга з ароматичними альдегідами у присутності основи:

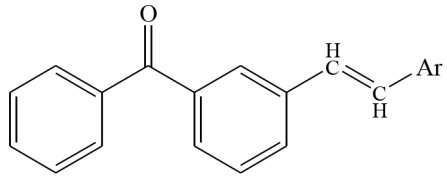
$$[(C_6H_5)_3\overset{+}{P}—CH_2Ar]Hal^- \xrightarrow[NaOH]{CH_2Cl_2} (C_6H_5)_3P{=}CH—Ar \xrightarrow{Ar—CHO} Ar—CH{=}CH—Ar + (C_6H_5)_3PO$$

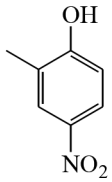
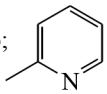
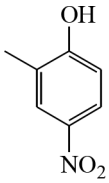
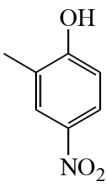
Загальна методика проведення синтезу така:

0.002–0.003 моль фосфонієвої солі і стільки ж ароматичного альдегіду розчиняли у 15 мл метиленхлориду чи 1-пропанолу. У деяких випадках для повного розчинення фосфонієвої солі розчин нагрівали. Після цього до реакційної суміші додавали 0.5–0.7 мл триетиламіну або 5 мл 5Н розчину NaOH. Реакційну суміш залишали на добу, у випадку застосування водного розчину лугу (двофазна система) – на магнітній мішалці.

Після випадання утворених діарилетиленів в осад їх відфільтровували і очищували перекристалізацією з 1-пропанолу. Будову отриманих продуктів контролювали з допомогою ПМР-спектроскопії.

Серед синтезованих нових діарил- (і гетароїл-) етиленів слід назвати зокрема такі, що містять фрагмент бензофенону (**I–IV**), отримані на основі (4-бензоїлбензил)трифенілфосфоній броміду:



де Ar =  (**I**);  (**II**);  (**III**);  (**IV**)

Реакція легко відбувається і в однофазній, і в двофазній системі, однак застосування триетиламіну в ролі основи дає дещо кращий вихід. Нижче наведено спектри ПМР діарилетиленів (**I**) та (**II**).

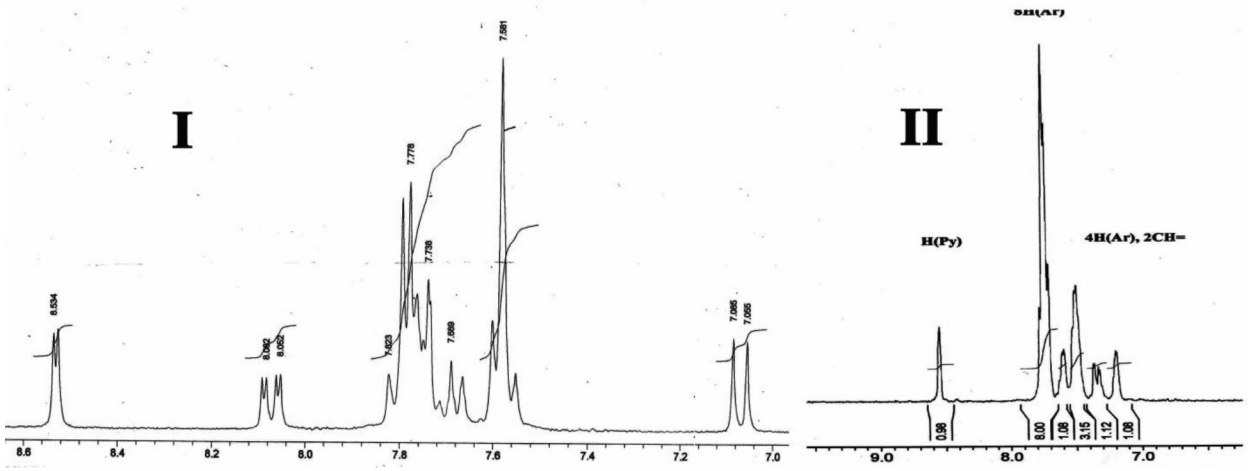
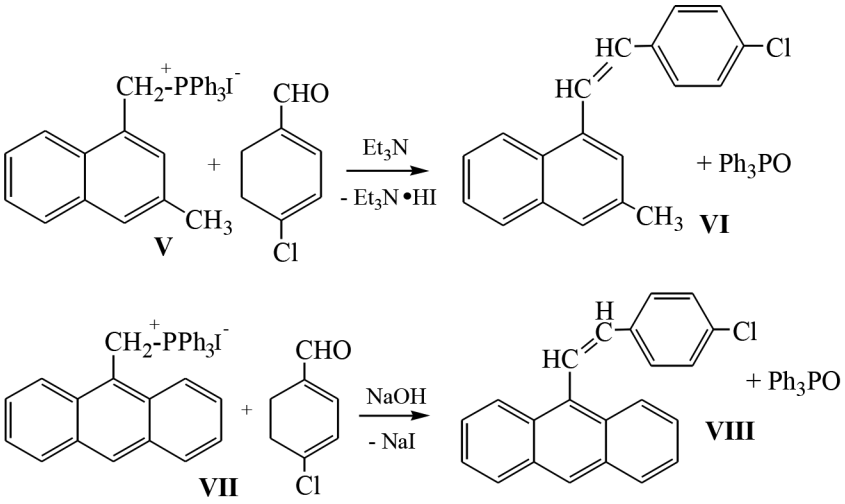


Рис. 1. Спектри ПМР синтезованих діарилетиленів I (зліва) та II (справа)

Цікавим також є застосування фосфонієвих солей – похідних нафталену (**V**) і антрацену (**VII**), що, взаємодіючи з ароматичними альдегідами, дозволяють отримати відповідні ненасичені похідні (**VI**) і (**VIII**). Наявність конденсованих поліциклічних систем у молекулах даних сполук дає підстави очікувати підсилення їх люмінесцентних властивостей.



Розчини усіх отриманих речовин демонструють виражену синю флюоресценцію при опроміненні УФ-світлом, що підтверджує перспективність їх подальшого вивчення у даному напрямку.

Висновки

В результаті проведеної роботи опрацьовано простий і доступний метод одержання потенційних люмінофорів – діарилетиленів із застосуванням реакції Віттіга. Доведено можливість використання як вихідних реагентів фосфонієвих солей і ароматичних альдегідів без виділення проміжних продуктів – алкіліденфосфоранів, що значно знижує працемісткість процесу і робить можливим отримання бажаних продуктів у випадках, коли відповідні іліди фосфору нестійкі і взагалі не можуть бути виділені в індивідуальному стані. З'ясовано, що реакцію можна проводити і в однофазній, і в двофазній системі з використанням простих і доступних основ – триетиламіну чи їдкого лугу. Отримано низку нових 1,2-діарилзаміщених похідних етену, зокрема, з конденсованими циклами.

Список використаної літератури

1. Zhang J., Tian H. The Endeavor of Diarylethenes: New Structures, High Performance, and Bright Future. *Advanced Optical Materials*. 2018. Vol.6. I.6. 1701278. DOI: https://doi.org/10.1002/adom.201701278

2. Li Z., Xia J., Liang J., Yuan J., Jin G., Yin J., Yu G.-A., Liu S.H. Synthesis of diarylethene derivatives containing various heterocycles and tuning of light-emitting properties in a turn-on fluorescent diarylethene system. *Dyes and Pigments*. 2011. Vol. 90. I. 3. P. 290–296. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2011.01.00

3. Irie M., Fukaminato T., Matsuda K., Kobatake S. Photochromism of Diarylethene Molecules and Crystals: Memories, Switches, and Actuators. *Chemical Reviews*. 2014. Vol.114. I.24. 12174–12277. doi: https://doi.org/10.1021/cr500249p

4. Becker K.B., Synthesis of Stilbenes. *Synthesis*. 1983. Vol. 1983. P. 341–368. DOI: https://doi.org/10.1055/s-1983-30334

5. Mali R.S., Jagtap P.G. Efficient Synthesis of E-Stilbenes. *Synthetic Communications*. 1991. Vol. 21. I. 7. P. 841–848. DOI: https://doi.org/10.1080/00397919108019767

6. Zheng C., Fan C., Pu S., Chen B. A novel Br-substituted diarylethene: Synthesis, crystal structure, and solvent dependent acidichromism. *Journal of Molecular Structure*. 2016. Vol. 1123. P. 355–359. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.06.040

7. Shen X., Liu P., Liu Y., Dai B. Synthesis of 1,2-Diarylethylenes by Pd-Catalyzed One-Pot Reaction of Benzyl Halides, Tosylhydrazide, and Aryl Aldehydes. *Letters in Organic Chemistry*. 2018. V. 15. I. 8. P. 709–715. DOI: https://doi.org/10.2174/1570178615666171222163927

8. Listvan V.M. Phosphonium salts and ylides in diarylethylenes and diarylacetylenes synthesis. *Functional Materials*. 2006. V. 3. No. 4. P. 496–501.

References

1. Zhang J., Tian H. (2018) The Endeavor of Diarylethenes: New Structures, High Performance, and Bright Future. Advanced Optical Materials. Vol. 6. I. 6. 1701278. DOI: https://doi.org/10.1002/adom.201701278

2. Li Z.,, Xia J., Liang J., Yuan J., Jin G., Yin J., Yu G.-A., Liu S.H. (2011) Synthesis of diarylethene derivatives containing various heterocycles and tuning of light-emitting properties in a turn-on fluorescent diarylethene system. *Dyes and Pigments*. Vol. 90. I. 3. P. 290–296. DOI: https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2011.01.008

3. Irie M., Fukaminato T., Matsuda K., Kobatake S. (2014) Photochromism of Diarylethene Molecules and Crystals: Memories, Switches, and Actuators. *Chemical Reviews*. Vol. 114. I. 24. 12174–12277. DOI: https://doi.org/10.1021/cr500249p

4. Becker K. B. (1983) Synthesis of Stilbenes. *Synthesis*. Vol. 1983. P. 341–368. DOI: https://doi.org/10.1055/s-1983-30334

5. Mali R. S., Jagtap P. G. (1991) Efficient Synthesis of E-Stilbenes. *Synthetic Communications*. Vol. 21. I. 7. P. 841–848. DOI: https://doi.org/10.1080/00397919108019767

6. Zheng C., Fan C., Pu S., Chen B. (2016) A novel Br-substituted diarylethene: Synthesis, crystal structure, and solvent dependent acidichromism. *Journal of Molecular Structure*. Vol.1123. P.355-359. DOI: https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2016.06.040

7. Shen X., Liu P., Liu Y., Dai B. (2018) Synthesis of 1,2-Diarylethylenes by Pd-Catalyzed One-Pot Reaction of Benzyl Halides, Tosylhydrazide, and Aryl Aldehydes. *Letters in Organic Chemistry*. V. 15. I. 8. P. 709–715. DOI: https://doi.org/10.2174/1570178615666171222163927

8. Listvan V. M. (2006) Phosphonium salts and ylides in diarylethylenes and diarylacetylenes synthesis. *Functional Materials*. V. 3. No. 4. P. 496–501.

УДК 687+677.4+004.35 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.47

В. В. МИЦА
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри технології і конструювання швейних виробів
Хмельницький національний університет
ORCID: 0000-0002-5453-9787

М. Л. РЯБЧИКОВ
доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технологій легкої промисловості
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-9382-7562

ЦИФРОВІ МЕТОДИ 3D ПРОТОТИПУВАННЯ ПРИ СТВОРЕННІ РОЗУМНИХ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ З КЕРОВАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

У статті досліджено перспективи застосування технологій 3D-друку в текстильній промисловості, зокрема у створенні смарт-текстильних матеріалів. Проаналізовано переваги та виклики, пов'язані з інтеграцією адитивних технологій у виробництво текстильних матеріалів. Особливу увагу приділена розробці нових матеріалів, що поєднують традиційні текстильні характеристики з можливостями 3D-прототипування.

У ході дослідження підтверджено можливість синтезу тривимірних текстильних структур, здатних змінювати свої механічні та фізичні властивості залежно від умов експлуатації. Встановлено, що форма поперечного перерізу структурних елементів суттєво впливає на жорсткість матеріалу. Використання трапецієподібних або порожнистих конструкцій дозволяє керовано регулювати жорсткість, що відкриває нові можливості для створення адаптивних матеріалів.

Досліджено також методи регулювання повітропроникності текстильних структур за допомогою 3D-друкованих пелюсткових елементів, здатних змінювати свою форму під дією аеродинамічних сил. Це дає змогу розробляти матеріали з контрольованою вентиляцією, що може знайти застосування у виробництві спортивного одягу, захисного спорядження та медичних виробів.

Окрему увагу приділено використанню магнітних складових у процесі 3D-друку для створення інтелектуальних адаптивних структур, здатних змінювати свої характеристики під впливом електромагнітного поля. Такий підхід відкриває можливості для динамічного керування властивостями текстильних матеріалів у режимі реального часу.

Перспективними напрямами подальших досліджень є вдосконалення матеріалів для 3D-друку, розробка методів інтеграції електропровідних елементів у текстильні структури та оптимізація технологій швидкого прототипування для створення функціонально адаптивних текстильних виробів.

Ключові слова: *3D-друк текстильних матеріалів, адитивні технології, смарт-текстиль, повітропроникність, жорсткість.*

V. V. MYTSA
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Garment Technology and Design
Khmelnytskyi National University
ORCID: 0000-0002-5453-9787

M. L. RIABCHYKOV
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Consumer Industry Technology
Lutsk National Technical University
ORCID: 0000-0002-9382-7562

DIGITAL 3D PROTOTYPING METHODS FOR CREATING SMART TEXTILE MATERIALS WITH CONTROLLABLE PARAMETERS

The article explores the prospects of applying 3D printing technologies in the textile industry, particularly in the creation of smart textile materials. It analyzes the advantages and challenges associated with the integration of additive technologies into the production of textile materials. Special attention is given to the development of new materials that combine traditional textile characteristics with the capabilities of 3D prototyping.

The study confirms the possibility of synthesizing three-dimensional textile structures capable of altering their mechanical and physical properties depending on operational conditions. It is established that the cross-sectional shape of structural elements significantly affects the material's stiffness. The use of trapezoidal or hollow constructions allows for controlled adjustment of stiffness, opening new opportunities for creating adaptive materials.

Methods for regulating the air permeability of textile structures using 3D-printed petal elements that can change their shape under aerodynamic forces are also investigated. This enables the development of materials with controlled ventilation, which can be applied in the production of sportswear, protective gear, and medical products.

Particular attention is given to the use of magnetic components in the 3D printing process to create intelligent adaptive structures capable of changing their characteristics under the influence of an electromagnetic field. This approach opens possibilities for dynamic control of textile material properties in real-time.

Promising directions for further research include improving materials for 3D printing, developing methods for integrating conductive elements into textile structures, and optimizing rapid prototyping technologies to create functionally adaptive textile products.

Key words: *3D printing of textile materials, additive technologies, smart textiles, air permeability, stiffness.*

Постановка проблеми

Попри стрімкий розвиток технологій 3D-друку, їхнє широкомасштабне застосування у текстильній промисловості поки що залишається обмеженим. Інтеграція тривимірного (3D) друку у виробництво текстильних матеріалів демонструє значний потенціал, однак супроводжується низкою викликів та технічних обмежень.

Однією з ключових проблем є підбір матеріалів, які відповідатимуть вимогам до м'якості, еластичності, гнучкості та повітропроникності. Більшість 3D-принтерів працюють з жорсткими або напівгнучкими полімерними матеріалами, які не забезпечують необхідних тактильних і механічних властивостей, характерних для традиційних текстильних тканин. Розробка інноваційних полімерних композитів, що поєднуватимуть ергономічність текстилю з технологічними перевагами 3D-друку, залишається однією з основних наукових і технічних задач у цій галузі.

Окремим напрямком досліджень є розробка розумного (смарт) текстилю – матеріалів, здатних реагувати на зовнішні впливи, зокрема зміни температури, рух, тиск, електричні сигнали або біометричні показники. Використання 3D-друку у створенні смарт-текстильних матеріалів відкриває нові можливості у таких сферах, як медична реабілітація, спортивне екіпірування, військова амуніція, адаптивний одяг тощо. На сьогодні дослідження технологій 3D-друку для смарт-текстилю перебувають на початковій стадії, а наявні конструкційні рішення ще не відповідають повною мірою вимогам гнучкості, довговічності та комфорту. Подальші розробки у цьому напрямку є перспективними та можуть стати основою для інноваційних рішень у текстильній інженерії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Методи тривимірного друку належать до інноваційних виробничих технологій, що дозволяють створювати структури довільної геометрії [1]. Однак їхнє впровадження у виробництво одягу поки що переважно обмежується виготовленням певних аксесуарів і декоративних елементів [2], деталей взуття [3]. Значний вплив на розвиток адитивних технологій у легкій промисловості має комплексна цифровізація виробничих процесів. В дослідженнях [4, 5] розглядається взаємозв'язок між використанням цифрових інструментів та можливостями їх інтеграції у створення текстильних матеріалів з новими функціональними властивостями.

Відповідно до закордонних досліджень, технології 3D-друку можуть стати перспективними напрямом для створення текстильних структур [6]. При цьому декоративне оздоблення виробів за допомогою адитивних технологій лише частково вирішує проблему інтеграції швидкого прототипування у текстильну промисловість [7]. У дослідженні [8] вперше запропоновано поєднати можливості 3D-прототипування з перспективами розумних текстильних систем. Традиційно смарт-текстиль передбачає створення вбудованих сенсорів, антен, провідних схем та інших електронних компонентів безпосередньо на текстильних матеріалах [9]. Однак можливості цифрового 3D друку значно ширші.

Практично необмежені можливості у формуванні довільної геометрії виробу відкривають перспективи проєктування текстильних матеріалів з керованими механічними та фізичними властивостями. Зокрема, геометричні характеристики волокон суттєво впливають на жорсткість матеріалу [10] та його повітропроникність [11, 12]. На жаль, методи швидкого прототипування поки що не набули широкого застосування у створенні структур з можливістю регулювання цих параметрів. Керованість властивостей друкованих текстильних матеріалів може забезпечуватися інтеграцією порошкових магнітних матеріалів [13, 14], що дозволяє модифікувати склад матеріалів для 3D-друку. Крім того, перспективним напрямом є вбудовування електропровідних елементів вздовж структурних текстильних компонентів безпосередньо в процесі 3D-друку [15].

Формулювання мети статті

Мета дослідження – обґрунтувати можливість синтезу тривимірних текстильних структур, орієнтованих на виробництво методами 3D-прототипування, які здатні самостійно регулювати певні параметри, зокрема жорсткість та повітропроникність.

Виклад основного матеріалу дослідження

Синтез текстильних структур для 3D-друку

Текстильні матеріали, з геометричної точки зору, зазвичай являють собою мережу комірок, що складається з певного поєднання структурних елементів, які повторюються у площині або просторі. При традиційному створенні текстильних структур використовуються структурні елементи у вигляді волокон і ниток різного походження, переріз яких зазвичай є стандартним і наближається до кола. Застосування 3D-друку вперше дозволяє створювати геометричні структури довільної форми, що відкриває нові можливості у проєктуванні текстильних матеріалів. Переріз друкованих структурних елементів може мати різноманітні форми, включаючи коло, квадрат, трапецію, еліпс або інші довільні конфігурації. Формування волокон у цифровому середовищі відбувається за допомогою твердотільного моделювання, де застосовується метод віртуального екструдування (sweeping) плоскої геометричної фігури вздовж заданої траєкторії. Цей підхід усуває необхідність використання дорогого технологічного обладнання та забезпечує гнучкість у проєктуванні. Побудована таким чином мережа віртуальних волокон створюється у цифровому середовищі, що дозволяє здійснювати її параметричне налаштування та надалі виготовляти отримані структури методом 3D-друку.

Окремим завданням при синтезі текстильних структур є розробка ефективних методів з'єднання волокон, оскільки характер взаємодії між окремими елементами може суттєво впливати на механічні характеристики матеріалу. Дане питання потребує подальших досліджень та оптимізації конструктивних рішень. На рис. 1 представлені потенційні текстильні структури, які можуть бути виготовлені за допомогою 3D-прототипування, з використанням елементів різного перерізу.

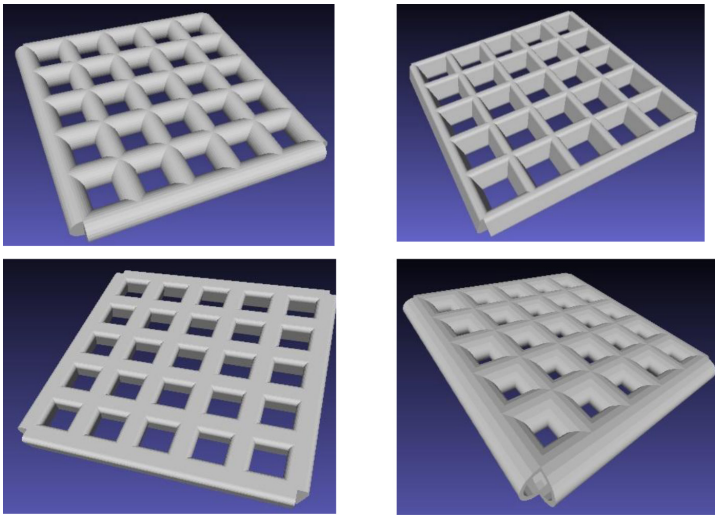


Рис. 1. Можливі структури текстильних виробів, виготовлені методами 3D-прототипування

Синтез структур з регулюванням жорсткості

Очевидно, що зміна форми поперечного перерізу структурних елементів суттєво впливає на механічні характеристики отриманих текстильних мереж. Зокрема, параметри жорсткості таких структур значною мірою визначаються жорсткістю окремих елементів, яка, у свою чергу, залежить від геометрії їхнього перерізу та моменту інерції.

Традиційно жорсткість структурних елементів оцінюється через момент інерції їхнього поперечного перерізу. Для порівняння можна розглянути моменти інерції для циліндричного елемента діаметром D та трапецієподібного елемента з більшою основою b, меншою основою a і висотою h:

$$J_c = \frac{\pi D^4}{64}, \tag{1}$$

$$J_t = \frac{h^3(b^2 + 4ba + a^2)}{36(a+b)}. \tag{2}$$

Очевидно, що при однаковій площі поперечного перерізу момент інерції I, а отже і жорсткість, має значно вищі значення для трапецієподібного перерізу. Це пояснюється нерівномірним розподілом маси відносно нейтральної осі, що збільшує опір елемента до згинальних деформацій.

Аналогічні висновки можна зробити і для порожнистих елементів, виготовлених за допомогою методів просторового прототипування. Наприклад, розглянемо переріз у вигляді кола. Якщо на таку структуру діють стискаючі

сили, то її поперечний переріз може трансформуватися в еліпс, що суттєво змінює її механічні властивості. Таким чином, використання перерізів змінної геометрії (рис. 2) дозволяє контролювати жорсткість текстильних структур, що відкриває можливості для створення адаптивних матеріалів, здатних змінювати свої механічні властивості залежно від умов експлуатації.

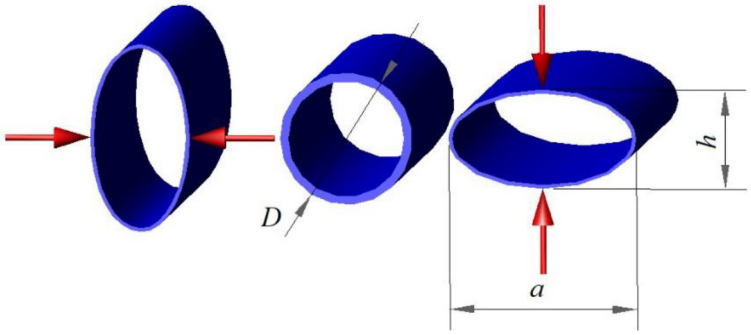


Рис. 2. Елементи текстильних структур зі змінною жорсткістю

Момент інерції еліптичного перерізу, який визначає жорсткість волокна, розраховується за формулою:

$$J = \frac{\pi a b^3}{64}, \tag{3}$$

де a – велика піввісь еліпса, b – мала піввісь.

Залежно від орієнтації еліпса щодо осі навантаження, жорсткість волокна може збільшуватися або зменшуватися. Це дозволяє керовано змінювати механічні характеристики текстильних структур у відповідь на зовнішні впливи.

Одним з ключових питань є визначення джерела сил, здатних деформувати тонкостінні волокна для зміни їхньої геометрії. Одним із перспективних підходів є включення магнітних порошків у склад друкованих структур, що надає матеріалу магнітні властивості. Завдяки цифровим методам 3D-прототипування можливо локально змінювати вміст магнітних компонентів, що дозволяє диференційовано регулювати механічні характеристики матеріалу.

Під час 3D-друку у порожнисту структуру може бути інтегрований струмопровідний елемент (рис. 3).

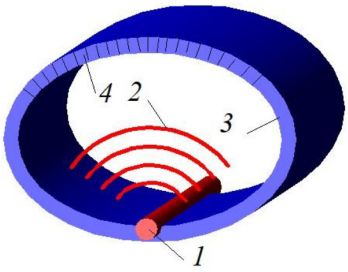


Рис. 3. Сили деформування елементів структури під дією електромагнітного поля

При проходженні електричного струму через елемент 1, навколо нього утворюється магнітне поле 2, яке впливає на тонкостінну еліптичну конструкцію 3. Вплив відбувається на зону з найбільшим вмістом магнітних складових 4, що спричиняє зміну геометрії волокна.

Внаслідок цього змінюється жорсткість структурних елементів, а отже, і механічні характеристики всього синтезованого матеріалу. Такий процес може здійснюватися як у режимі примусового регулювання, так і автоматично, створюючи адаптивну (смарт) структуру, здатну динамічно змінювати свої властивості під впливом зовнішніх факторів.

Синтез структур з регулюванням повітропроникності

Розширений аналіз 3D-друкованих текстильних матеріалів дозволяє розглядати не лише жорсткість, але й такі важливі характеристики, як повітропроникність. Повітропроникність визначає здатність матеріалу пропускати повітря під впливом перепаду тиску з обох сторін. Вона є критично важливим параметром для одягу, технічних текстильних матеріалів, медичних виробів та інших застосувань.

Стандартний підхід до визначення повітропроникності передбачає застосування методу диференційного тиску, який відповідає міжнародним стандартам ISO 9237, ASTM D737. Суть цього методу полягає у визначенні об’єму повітря, що проходить через зразок тканини під дією перепаду тиску за певний проміжок часу.

Традиційно вважається, що ключовими факторами, які впливають на повітропроникність є щільність, товщина матеріалу та структура плетіння. Однак у традиційних текстильних волокнах форма поперечного перерізу структурного елемента залишається майже незмінною, що суттєво обмежує можливості контролю опору повітряного потоку.

На відміну від традиційного підходу, використання 3D-друку дозволяє синтезувати довільні просторові форми структурних елементів, що відкриває нові можливості для регулювання повітропроникності шляхом контролю геометрії структурних елементів.

При проходженні повітряного потоку крізь отвори текстильного матеріалу виникають місцеві опори, спричинені змінами форми зовнішніх кордонів отвору. Очевидно, шо найбільші газодинамічні опори у 3D-друкованих текстильних структурах спостерігаються при використанні елементів з перерізом у вигляді трапеції.

При порівнянні обтікання циліндричних і призматичних елементів важливо врахувати їхні аеродинамічні характеристики, оскільки їхня взаємодія з потоком повітря суттєво відрізняється. Втрати тиску під час обтікання перешкод визначаються рівнянням:

$$\Delta p = C_d \frac{\rho v^2}{2}, \tag{4}$$

де: v – швидкість потоку, ρ – густина повітря, C_d – коефіцієнт опору, який залежить від форми поверхні.

Зокрема, для ідеального циліндра в потоці $C_d \approx 0.47$ основний внесок у втрати енергії дає тискова складова (відрив потоку за тілом). Повітряний потік обтікає циліндр, утворюючи зони низького тиску позаду, що спричиняє вихровий слід (вихори Кармана).

Для призматичних елементів коефіцієнт опору залежить від співвідношення сторін і орієнтації у потоці. Зокрема, для квадратного перерізу $C_d \approx 1.05$. При збільшенні співвідношення сторін для форми трапеції коефіцієнт опору збільшується наближаючись до $C_d \approx 2.0$. При цьому домінують лобове гальмування та турбулентний відрив потоку на гострих гранях, що створює великі зони низького тиску та суттєво підвищує опір потоку. При однакових розмірах і швидкості набігаючого потоку циліндр зазвичай має менший аеродинамічний опір.

Вимоги до повітропроникності текстильних матеріалів можуть суттєво відрізнятися залежно від призначення виробу. Для спортивного та захисного одягу, який використовується в умовах сильного вітру, важливо мати можливість регулювання параметрів проходження повітря. Оптимальним рішенням є текстильні матеріали, які можуть пропускати спокійне повітря та гальмувати потоки високої швидкості.

Сучасні технології 3D-прототипування дозволяють створювати складні геометричні структури, які неможливо отримати традиційними методами. Одна з таких концепцій – пелюсткова структура (рис. 4), що складається з поздовжніх (1) та поперечних (2) елементів, між якими формуються комірки з гнучкими пелюстками (3).

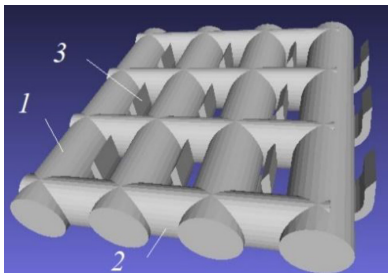


Рис. 4. Пелюсткова структура тривимірного текстильного матеріалу

Пелюстки на друкованих волокнах виконують роль гнучких елементів, які здатні деформуватися під дією зовнішніх сил (рис. 5). У випадках низької жорсткості пелюсток їхній прогин може бути порівнянним з відстанню між окремими елементами текстильного матеріалу.

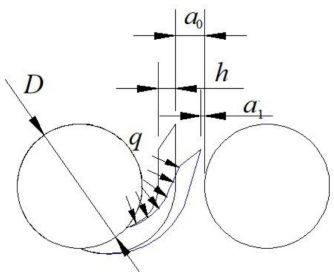


Рис. 5. Деформації пелюсткових елементів під дією стиснутого повітря

При набіганні повітряного потоку з надлишковим тиском p виникає розподілене навантаження $q = p \cdot b$, де b – ширина пелюстка, що дорівнює відстані між поперечними елементами текстильної структури.

При цьому максимальний прогин гнучкого елемента довжиною D під впливом стиснутого повітря визначається за формулою:

$$\Delta = \frac{3}{2}\frac{pD^4}{Eh^3}, \quad (5)$$

де: Δ – прогин гнучкого елемента пелюстки; p – тиск стиснутого повітря; D – довжина гнучкого елемента пелюстки; E – модуль Юнга (модуль пружності матеріалу пелюстки); h – товщина пелюстки.

Для гнучких пелюсткових елементів величина їхнього прогину може бути порівнянною з відстанню між структурними, що створює можливість саморегулювання повітропроникності матеріалу.

У випадку низької швидкості повітряного потоку пелюстки залишаються притиснутими до поверхні циліндричних елементів, не створюючи значного аеродинамічного опору. При збільшенні швидкості потоку зростає динамічний тиск, що викликає прогин пелюсток, які перекривають проміжки між структурними елементами, тим самим зменшуючи ефективний коефіцієнт повітропроникності.

Такий ефект можливий завдяки складній просторовій формі текстильної структури, яку можна реалізувати виключно методами 3D-друку (рис. 6).

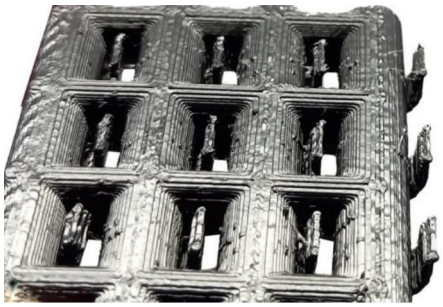


Рис. 6. Пелюсткова структура, виготовлена методами 3D-прототипування

Застосування магнітних матеріалів у 3D-друкованих текстильних структурах дозволяє створити смарт-ефекти, що забезпечують адаптивне регулювання повітропроникності відповідно до заданих умов експлуатації. Зокрема, пелюстки текстильних структур можуть бути виготовлені з магнітними наповнювачами, що змінюють свої механічні властивості під впливом електромагнітного поля.

Крім того, у поздовжніх елементах можуть бути інтегровані електропровідні компоненти, через які може проходити електричний струм. Цей струм генерує магнітне поле, здатне деформувати гнучкі пелюстки. В результаті цього процесу повітропроникність текстильного матеріалу може контролюватися в реальному часі, забезпечуючи динамічну адаптацію до змінних умов навколишнього середовища.

Висновки

Технології 3D-друку демонструють значний потенціал для впровадження у текстильну промисловість, зокрема у виробництво смарт-текстилю. Однак їх широкомасштабне використання наразі обмежене технологічними та матеріалознавчими викликами, серед яких ключову роль відіграють фізико-механічні властивості матеріалів. Розробка нових полімерних композицій, що поєднують характеристики традиційних текстильних матеріалів з можливостями 3D-друку, залишається актуальним завданням для дослідників і виробників.

Проведене дослідження підтвердило можливість синтезу тривимірних текстильних структур з можливістю керованої зміни механічних та фізичних характеристики, зокрема жорсткості та повітропроникності. Було встановлено, що форма поперечного перерізу структурних елементів суттєво впливає на жорсткість матеріалу. Використання трапецієподібних або порожнистих конструкцій дозволяє контролювати жорсткість, забезпечуючи оптимальні характеристики для конкретних експлуатаційних умов.

Розглянуто можливість регулювання повітропроникності текстильних матеріалів шляхом використання 3D-друкованих пелюсткових структур, які змінюють свою форму під впливом аеродинамічних сил. Це відкриває перспективи для створення матеріалів зі змінною вентиляцією, що може бути корисним у виробництві спеціалізованого одягу для екстремальних умов, спортивного спорядження та медичних виробів.

Крім того, показано, що інтеграція магнітних компонентів у процесі 3D-друку дозволяє створювати адаптивні текстильні структури, здатні змінювати свої фізико-механічні властивості під впливом електромагнітного поля. Такий підхід розширює можливості динамічного керування характеристиками текстильних матеріалів у реальному часі.

Таким чином, результати дослідження підтверджують перспективність застосування 3D-друку в текстильній галузі. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію матеріалів для друку, розробку методів інтеграції електропровідних елементів у текстильні структури та вдосконалення технологій швидкого прототипування для створення функціонально адаптивних текстильних виробів.

Список використаної літератури

1. Бачинський В., Шкурпіт О., Гнатюк О. Розробка методу вибору моделі 3D-принтера для виготовлення деталей для ремонту і модернізації безпілотних літальних апаратів в умовах бойових дій. *Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : Військові та технічні науки*. 2024. № 2. С. 150–157. https://doi.org/10.32453/3.v95i2.1667

2. Трегуб Н.Є., Альніков Є.М., Шиянова А.О. Сучасний стан наукової думки та досягнення технологій 3D-принтерного друку в дизайні. *Традиції та новації у вищій архітектурно-художній освіті*. 2017. Вип. 1. С. 137–147. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tnvakho_2017_1_23

3. Polishchuk, A., Slavinska, A., Polishchuk, O., Mytsa, V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings*. 7 December 2023; 2889 (1): 040009. https://doi.org/10.1063/5.0172971

4. Рябчиков М.Л., Мица В. Модель комплексної цифровізації в індустрії моди. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2024. № 4(91). С. 217–225. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.28

5. Мица В. Цифрова трансформація fashion-індустрії: ключові технологічні тренди та інновації. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: Технічні науки*. 2024. № 4(339). С. 296–300. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-47

6. Zhang, J., Shen, D., Yu, Y., Bao, D., Li, C., Qin, J. (2024). Direct-print thermally responsive 4D textiles by depositing PLA on prestretched fabrics. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 2, 277–286. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0125

7. Kechagias, J.D., Chaidas, D., Spahiu, T. (2024). Decorative 3D printing on textiles using elastomer TPU filament under different printing conditions. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 10, 2033-2042. https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2024-0106

8. Tkac, J., Hajnys, J., Mizera, O., Molnar, V., Fedorko, G., Cepova, L. (2024). Additive technologies use to create structures for technical fabric replacement. *Journal of Industrial Textiles*. 54. https://doi.org/10.1177/15280837241245121

9. Mytsa, V., Riabchykov, M. (2024) Improvement of intelligent systems for creating personalized products, *CEUR Workshop proceedungs*, 3896, 235–247. https://ceur-ws.org/Vol-3896/

10. Sadretdinova N.V., Yatsenko M.V. (2022). Wear comfort evaluation of textile from different types of raw materials using an integrated approach. *Fashion Industry* / (3), 26–35. https://doi.org/10.30857/2706-5898.2021.3.1/

11. Пелик Л.В., Остапчук О.В. Дослідження повітропроникності текстильних матеріалів із використанням луб'яних волокон, *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2020. № 2, 181–184. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-181-184

12. Shoaib, M., Jamshaid, H., Mishra, R.K., Iqbal, K., Müller, M., Chandan, V., Alexiou Ivanova, T. (2024). Flammability and Thermoregulation Performance of Multilayer Protective Clothing Incorporated with Phase Change Materials. *Materials*. 17(23), 5826. https://doi.org/10.3390/ma17235826

13. Рябчиков М., Назарчук Л., Стицюк В., Ткачук О., Каган О. Перспективи впровадження магнітних текстильних матеріалів з вмістом наноскладових на основі дво і тривалентного оксидів заліза. *Herald of Khmelnytskyi National University*. Technical Sciences. 2022. 311(4), 220–226. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-220-226

14. Riabchykov, M., Alexandrov, A., Trishch, R., Nikulina, A., Korolyova, N. (2022). Prospects for the development of smart clothing with the use of textile materials with magnetic properties, *Tekstilec*. 65(1), 36–43. https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2021050.

15. Zhang, Z., *et al*. (2025). Kongjun zhu study of the design and performance of multibody carbon fiber structural supercapacitors with superior mechanical and electrochemical properties, *ACS Applied Energy Materials*. 8, 4, 2485–2497. https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03072

References

1. Bachynskyi V., Shkurpit O., Hnatiuk O. Rozrobka metodu vyboru modeli 3D-pryntera dlia vyhotovlennia detalei dlia remontu i modernizatsii bezpilotnykh litalnykh aparativ v umovakh boiovykh dii. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Seriia : Viiskovi ta tekhnichni nauky*. 2024. № 2. S. 150–157. https://doi.org/10.32453/3.v95i2.1667

2. Trehub N.Ye., Alnikov Ye.M., Shyianova A.O. Suchasnyi stan naukovoi dumky ta dosiahnennia tekhnolohii 3D-prynternoho druku v dyzaini. *Tradytsii ta novatsii u vyshchii arkhitekturno-khudozhnii osviti*. 2017. Vyp. 1. S. 137–147. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tnvakho_2017_1_23

3. Polishchuk, A., Slavinska, A., Polishchuk, O., Mytsa, V. (2023). Production of details of difficult designs of footwear and clothes with use of technologies of additive production. *AIP Conference Proceedings.* 7 December 2023; 2889(1): 040009. https://doi.org/10.1063/5.0172971

4. Riabchykov M. L., Mytsa V. Model kompleksnoi tsyfrovizatsii v industrii mody. *Visnyk Khersonskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*. 2024. № 4(91). S. 217–225. https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.4.28

5. Mytsa V. Tsyfrova transformatsiia fashion-industrii: kliuchovi tekhnolohichni trendy ta innovatsii. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Seriia: Tekhnichni nauky. 2024. № 4(339). S. 296–300. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-47

6. Zhang, J., Shen, D., Yu, Y., Bao, D., Li, C., Qin, J. (2024). Direct-print thermally responsive 4D textiles by depositing PLA on prestretched fabrics. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 2, 277–286. https://doi.org/10.1108/RPJ-04-2023-0125

7. Kechagias, J. D., Chaidas, D., Spahiu, T. (2024). Decorative 3D printing on textiles using elastomer TPU filament under different printing conditions. *Rapid Prototyping Journal*. 30, 10, 2033–2042. https://doi.org/10.1108/RPJ-03-2024-0106

8. Tkac, J., Hajnys, J., Mizera, O., Molnar, V., Fedorko, G., Cepova, L. (2024). Additive technologies use to create structures for technical fabric replacement. *Journal of Industrial Textiles*. 54. https://doi.org/10.1177/15280837241245121

9. Mytsa, V., Riabchykov, M. (2024) Improvement of intelligent systems for creating personalized products, *CEUR Workshop proceedungs*, 3896, 235–247. https://ceur-ws.org/Vol-3896/

10. Sadretdinova N. V., Yatsenko M. V. (2022). Wear comfort evaluation of textile from different types of raw materials using an integrated approach. *Fashion Industry* / (3), 26–35. https://doi.org/10.30857/2706-5898.2021.3.1/

11. Pelyk L. V., Ostapchuk O. V. Doslidzhennia povitropronyknosti tekstylnykh materialiv iz vykorystanniam lubianykh volokon, *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*. 2020. № 2, 181–184. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2020-283-2-181-184

12. Shoaib, M., Jamshaid, H., Mishra, R. K., Iqbal, K., Müller, M., Chandan, V., Alexiou Ivanova, T. (2024). Flammability and Thermoregulation Performance of Multilayer Protective Clothing Incorporated with Phase Change Materials. *Materials*. 17(23), 5826. https://doi.org/10.3390/ma17235826

13. Riabchykov M., Nazarchuk L., Stytsiuk V., Tkachuk O., Kahan O. Perspektyvy vprovadzhennia mahnitnykh tekstylnykh materialiv z vmistom nanoskladovykh na osnovi dvo i tryvalentnoho oksydiv zaliza. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2022. 311(4), 220–226. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-311-4-220-226

14. Riabchykov, M., Alexandrov, A., Trishch, R., Nikulina, A., Korolyova, N. (2022). Prospects for the development of smart clothing with the use of textile materials with magnetic properties, *Tekstilec*. 65(1), 36–43. https://doi.org/10.14502/tekstilec.65.2021050

15. Zhang, Z., *et al*. (2025). Kongjun zhu study of the design and performance of multibody carbon fiber structural supercapacitors with superior mechanical and electrochemical properties, *ACS Applied Energy Materials*. 8, 4, 2485–2497. https://doi.org/10.1021/acsaem.4c03072

УДК 665.58 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.1.1.48

М. Є. РАЦУК
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри хімічних технологій,
експертизи та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-1159-206X

Т. А. ЮРОВА
старший викладач кафедри хімічних технологій,
експертизи та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-8147-7024

Д. А. ЯЦЕНКО
здобувач освіти кафедри хімічних технологій,
експертизи та безпеки харчової продукції
Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0009-0000-7391-7061

ОДЕРЖАННЯ БАЛЬЗАМІВ ДЛЯ ГУБ ІЗ СОНЦЕЗАХИСНИМ ЕФЕКТОМ

Косметологи рекомендують оберігати від ультрафіолету відкриті ділянки тіла цілий рік. Сонцезахисний бальзам для губ має вирішальне значення для захисту ніжної шкіри губ від шкідливого впливу сонця. Подібно до нанесення сонцезахисного крему на обличчя та тіло, не менш важливо забезпечити губам високий рівень захисту. Губи мають тоншу шкіру та містять менше меланіну, природного пігменту, який захищає від шкідливих сонячних променів, що робить їх більш сприйнятливими до сонячних опіків та інших сонячних пошкоджень. Отже, сонцезахисний бальзам для губ – продукт, який допоможе зберегти губи красивими та здоровими.

Наразі відомо два основних типи сонцезахисних фільтрів: фізичні та хімічні. Кожен з них забезпечує захист за допомогою різних механізмів дії та має свої переваги та недоліки. Вибір між фізичними та хімічними фільтрами залежить від типу шкіри, індивідуальних уподобань та конкретних умов використання.

Фізичні сонцезахисні фільтри ефективно захищають шкіру від сонця у всьому спектрі ультрафіолетового (УФ) випромінювання, варто зазначити, що тільки фізичні УФ-фільтри дозволено використовувати в натуральній та органічній косметиці.

Хімічні фільтри ультрафіолетового випромінювання є найбільш поширеними та ефективними засобами для захисту шкіри від шкідливого впливу сонячних променів.

Розроблено рецептуру бальзаму для губ із сонцезахисним ефектом з використанням природних безпечних компонентів. Підтверджено можливість додавання до складу фізичних і хімічних УФ-фільтрів для забезпечення захисту від сонця, а також кольорових компонентів, таких як косметична міка Sunset Pink Mica та Apple Blossom.

Проведено оцінку органолептичних властивостей створеного продукту. Встановлено, що всі зразки бальзамів відповідають вимогам нормативної документації для таких засобів. Аналіз покривної здатності показав, що всі зразки мають однорідну текстуру, без грудочок і крупинок під час нанесення.

Одержані бальзами мають гарний колір, приємний аромат, є нешкідливими для губ завдяки використанню натуральних інгредієнтів.

Ключові слова: *бальзам для губ, сонцезахисна косметика, косметичні засоби, органолептичні показники, споживчі характеристики.*

M. E. RATSUK
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Chemical Technology,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-1159-206X

T. A. YUROVA
Senior Lecturer at the Department of Chemical Technology,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-8147-7024

D. A. YATSENKO
Student at the Department of Chemical Technology,
Expertise and Food Safety
Kherson National Technical University
ORCID: 0009-0000-7391-7061

PRODUCTION OF LIP BALMS WITH SUN PROTECTION EFFECT

Cosmetologists recommend protecting exposed areas of the body from UV all year round. A sunscreen lip balm is crucial for protecting the delicate skin of your lips from the harmful effects of the sun. Just like applying sunscreen to your face and body, it's equally important to provide your lips with a high level of protection. Lips have thinner skin and contain less melanin, a natural pigment that protects against harmful sunlight, making them more susceptible to sunburn and other sun damage. So, a sunscreen lip balm is a product that will help keep your lips beautiful and healthy.

There are currently two main types of sunscreen filters: physical and chemical. Each provides protection through different mechanisms of action and has its advantages and disadvantages. The choice between physical and chemical filters depends on your skin type, individual preferences, and specific conditions of use.

Physical sunscreens effectively protect the skin from the sun in the entire spectrum of UV radiation, and it is worth noting that only physical UV filters are allowed to be used in natural and organic cosmetics.

Chemical UV filters are the most common and effective means of protecting the skin from the harmful effects of sunlight.

A lip balm formulation with sun protection effect was developed using natural safe ingredients. The possibility of adding physical and chemical UV filters to the composition to provide sun protection, as well as color components such as Sunset Pink Mica and Apple Blossom was confirmed.

The organoleptic properties of the created product were evaluated. It was found that all samples of balms meet the requirements of regulatory documents for such products. The analysis of the covering ability showed that all samples have a homogeneous texture, without lumps and grains during application.

The resulting balms have a beautiful color, pleasant aroma, and are harmless to the lips due to the use of natural ingredients.

Key words: *lip balm, sunscreen cosmetics, cosmetic products, organoleptic characteristics, consumer characteristics.*

Постановка проблеми

Ринок косметичних засобів надзвичайно великий із мільйонами споживачів у всьому світі. Конкуренція на цьому ринку спонукає виробників до розширення асортименту і створення нових косметичних засобів із високою якістю і більшою ефективністю.

Історично сонцезахисні засоби насамперед були призначені для захисту від ультрафіолетових променів і запобігання сонячним опікам, але з ростом обізнаності споживачів щодо здоров'я шкіри зростає попит на продукти, які забезпечують більше, ніж просто захист, наприклад, покращують загальний мікробіом шкіри. За останні кілька років спостерігається тенденція до поєднання в складі одного засобу як доглядових інгредієнтів, так і сонцезахисних, це явище відоме як «скініфікація», що зробило революцію в сонцезахисному догляді в цілому.

Розвиток скініфікації зумовлений зростаючим попитом на багатофункціональні продукти, оскільки споживачі більше не хочуть обирати між захистом від сонця та доглядом за шкірою; вони хочуть отримати і те, і інше за один простий крок [1].

Косметика від сонця спрямована на захист шкіри від шкідливих ультрафіолетових променів, які можуть спричинити пошкодження ДНК клітин, передчасне старіння, пігментацію, запалення та навіть розвиток пухлин. Вчені наголошують: щоденний захист від сонця рятує від серйозних загроз. Ми не відчуваємо негативної дії УФ-променів, однак вони постійно атакують кожного із нас. Тому дуже важливо використовувати косметику сонцезахисну не тільки влітку, але й в інші пори року.

Вплив ультрафіолету на шкіру має накопичувальний характер. Серед довгострокових наслідків – ризик розвитку меланоми та передчасне старіння шкіри. Світла шкіра найбільше схильна до опіків, тому особливо вразливі до сонця люди першого та другого фототипу за шкалою Фітцпатріка. Утім, темніший колір – не привід нехтувати фотозахистом. Шкіра може не реагувати на сонце почервонінням, але зазнавати пошкоджень на більш глибоких рівнях [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Одне з найбільш забутих місць для використання сонцезахисту – це губи. Губи – одна з найважливіших рис обличчя для людини. Губи мають тонкий шар рогового шару, обмежену кількість меланіну і не мають захисного бар'єру, такого як потові залози, що робить їх більш вразливими до дії різних негативних факторів. Сухість губ є однією з найпоширеніших форм пошкодження. Негативний вплив УФ-променів, які вражають поверхневий шар кератинових клітин губ і викликають сухість, зумовлює необхідність захисту та догляду за губами [3]. Наразі косметична промисловість пропонує не дуже великий асортимент косметики для губ із сонцезахисним ефектом. Однак, завдяки зростаючому інтересу свідомих споживачів, прогнозований обсяг ринку сонцезахисних бальзамів

для губ сягне 1,7 млрд доларів США до 2030 року, при цьому середньорічний темп зростання становитиме 6,9 % у прогнозований період з 2024 по 2030 рік [4]. Сонцезахисні бальзами для губ, які пропонують додаткові переваги, як-от зволоження та антивікові властивості, сприяють цій тенденції, роблячи такі продукти привабливішими для споживачів, які шукають комплексних рішень з догляду за шкірою. Отже, розробка бальзаму, що захищатиме ніжну шкіру губ від негативного впливу випромінювання, є актуальним завданням.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є створення бальзаму для губ із сонцезахисним ефектом вдосконаленого складу.

Викладення основного матеріалу дослідження

Косметика для догляду за губами є важливим аспектом загальної рутини краси та догляду за собою, забезпечуючи губам здоров'я, захист і вишуканий вигляд. В асортименті цих косметичних продуктів можна знайти різноманітні засоби, кожен з яких виконує свої специфічні функції, від зволоження до захисту від шкідливих факторів навколишнього середовища. Цей сегмент є одним із ключових у галузі декоративної косметики.

Види декоративної та доглядової косметики для губ включають зокрема [5] помаду (рідку, матову, зволожуючу), блиск для губ, глітери, тинти, праймери, олію та бальзам для губ. Бальзами для губ є основою у догляді за губами та забезпечують необхідне зволоження та поживні речовини. В їх складі зазвичай містяться такі інгредієнти, як вітамін Е, масло ши, кокосове масло або бджолиний віск. Регулярне використання бальзаму може допомогти уникнути пошкоджень, спричинених холодним або сухим повітрям, і забезпечити захист від шкідливих ультрафіолетових променів, якщо в складі присутні відповідні компоненти.

Застосування бальзаму для губ допомагає зберегти вологу всередині шкіри, запобігти її випаровуванню. Крім того, що бальзам корисний для шкіри, він ще і візуально додає об'єм губам, має приємний аромат.

Для захисту шкіри від негативної дії ультрафіолетових променів до складу косметичних засобів додають ряд спеціальних речовин, що здатні поглинати, відбивати чи нейтралізувати дію ультрафіолету – УФ-фільтри. Якщо вони можуть поглинати УФ-випромінювання А, то вони є УФА-фільтрами, і аналогічно, УФВ-поглинаючі фільтри відомі як УФВ. Крім того, деякі фільтри, які можуть поглинати як УФА, так і УФВ, відомі як УФ-фільтри широкого спектра. За своєю природою УФ-фільтри поділяються на дві групи: фізичні та хімічні.

Нині широко використовуються продукти з неорганічними УФ-фільтрами, оскільки вони не проникають глибше в шкіру, що знижує виникнення алергічних реакцій. Головним недоліком є білуватий відтінок, який утворюється через розсіювання світла. Однак цю проблему можна подолати або за допомогою нанотехнологій, або шляхом додавання забарвлюючих речовин.

У формулах сонцезахисних продуктів використовуються природні речовини завдяки їх фотозахисному впливу різного механізму. Так, каротиноїди чинять фотозахисну дію, поглинаючи УФ-видиме і синє світло, фенольні сполуки підтримують правильну структуру шкіри, пригнічуючи еластазу і колагеназу та видаляють вільні радикали, що утворюються в результаті реакцій у присутності УФ-променів. До природних сполук, які володіють фотозахистними властивостями відносять лігнін, розмаринову кислоту, виноградні вичавки, екстракт бамбуку, екстракт червоних водоростей, екстракт морських грибів та ін. [6].

Взагалі, для сонцезахисного засобу можна підібрати будь-яку необхідну комбінацію УФ-фільтрів: наприклад, вибрати кілька УФВ фільтрів, або один фільтр з широким діапазоном поглинання, або підібрати комбінацію фільтрів для декількох зон ультрафіолетового спектру. Найчастіше використовуються одночасно УФА та УФВ фільтри.

Порівняння властивостей хімічних та фізичних УФ-фільтрів наведено в табл. 1 [7].

В роботі досліджували можливість одержання бальзаму для губ із сонцезахисним ефектом вдосконаленого складу. За основу взяли рецепт приготування бальзаму для губ наведений в табл. 2.

Технологія приготування бальзаму наступна. На водяній бані розплавляють віск і тверді олії, потім вводять сонцезахисний компонент, додають вітаміни та ефірну олію, заливають в тубу. Такий бальзам зручно використовувати не лише на губах, а й на вилицях, під очима та інших ділянках тіла, які потрапляють під безпосередній вплив променів сонця.

У рецепт розробленого бальзаму додавали вітаміни А та Е, які сприяють нормалізації обміну речовин, чинять активну антиоксидантну дію, відновлюють капілярний кровообіг, тканинну і судинну проникність, та ефірні олії ванілі та кориці.

Ефірна олія кориці (INCI: Cinnamomum Cassia Oil) відома своїми бактерицидними, антисептичними, спазмолітичними, заспокійливими і знеболюючими властивостями. Олія кориці має антиоксидантну дію, сприяє відновленню гарного фізичного і емоційного стану. Аромат кориці допомагає в боротьбі з депресією і хронічною втомою. Як афродізіак, сприяє налаштуванню на романтичний лад. У косметології олію кориці застосовують для догляду за шкірою і для лікування шкірних проблем. Вона сприяє підвищенню тонусу і еластичності шкіри. Активізує регенерацію клітин епідермісу, покращує стан шкіри. Допомагає позбутися від проявів целюліту. Завдяки своїм зігріваючим властивостям і здатності стимулювати кровообіг, також використовується (у вигляді масажу) для лікування артриту, ревматизму і порушень кровообігу, що супроводжується почуттям холодних рук і ніг. Зміцнює імунітет, допомагає при інфекційних захворюваннях верхніх дихальних шляхів, застуді і нежиті [8].

Таблиця 1

Порівняння властивостей хімічних та фізичних УФ-фільтрів

Показник	Фізичні санскріни	Хімічні санскріни
Як вони працюють	Захищають шкіру від сонця, відхиляючи або блокуючи сонячні промені	Діють, поглинаючи сонячні промені. Деякі хімічні фільтри можуть розсіювати сонячні промені, але в основному їх просто поглинають
УФ-фільтри (приклади)	Діоксид титану, оксид цинку, карбонат кальцію, оксид заліза, кремнезем	Octylcrylene, avobenzone, octinoxate, octisalate, oxybenzone
Стабільність	Загалом стабільний	Більшість є фотостабільними
Комедогенність	Діоксид титану може бути проблематичним для деяких людей. Оксид цинку, як правило, безпечний	Більше подразнюють шкіру. Деякі можуть викликати алергічні реакції
Захист	Діоксид титану захищає від УФВ-променів, але не від повного спектру УФА-променів. Оксид цинку захищає від усього спектру УФВ та УФА променів. Починає захищати відразу після нанесення	Забезпечують більший захист від УФА та УФВ променів, ніж фізичні сонцезахисні засоби. Для ефективного захисту від сонця необхідно почекати 20 хвилин після нанесення
Текстура	Густий і непрозорий, важко наносити. Має тенденцію залишати білий відтінок або відтінок. Легше стирається, і його потрібно часто повторювати	Безбарвний, без запаху, зазвичай рідкий. Іноді може виконувати роль праймера під макіяж, залежно від активної речовини та складу
Безпека	Досить безпечні, схвалені FDA. Не викликають утворення вільних радикалів. Наночастинки оксиду цинку та діоксиду титану наразі суперечливі	Загалом безпечні, однак деякі хімічні фільтри створюють вільні радикали, які можуть спричинити пошкодження шкіри, подразнення та старіння

Таблиця 2

Рецептура приготування бальзаму для губ

Найменування речовини	Масова частка, %
Віск бджолиний	15
Олія ши	20
Какао-масло	45
Сонцезахисний компонент (оксибензон)	10
Вітаміни	5
Ефірна олія м’яти	5
Разом	100

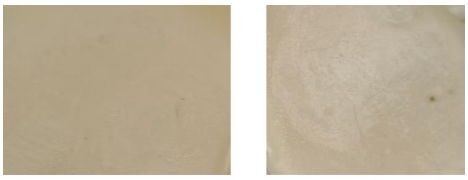
Ефірна олія ванілі (INCI – Vanilla planifolia oil) підходить для догляду за всіма типами шкіри, але завдяки вираженим заспокійливим і антисептичним властивостям добре допомагає проблемній і подразненій шкірі. За своєю дією це дуже м’яка олія і в догляді за проблемною шкірою вона дбайливо, але ефективно знімає запалення, почервоніння, заспокоює епідерміс, усуває нервовий висип і подразнення, сприяє профілактиці купероза. Аромаолія робить шкіру більш м’якою і бархатистою, еластичною і підтягнутою, сприяє її регенерації і збереженню вологи. Олія ванілі надає косметиці антисептичні, протизапальні, зволожуючі і омолоджуючі властивості. Олія також має відбілюючий і матуючий ефект [9].

На першому етапі досліджували можливість приготування бальзаму для губ з використанням замість бджолиного воску (INCI – Beeswax (Cera Alba)), який може викликати алергічні реакції, карнаубського воску (INCI – Copernicia cerifera wax), що є гіпоалергенний і тому використовується в косметичній промисловості для виробництва помад, тушей, тіней тощо, та канделільського воску (INCI – Euphorbia Cerifera (Candelilla) Wax), який також часто застосовується у виробництві косметики, є гіпоалергенним та підходить до чутливої шкіри. Встановлено, що бальзами, приготовані із використанням карнаубського та бджолиного восків швидко застигають, на відміну від бальзаму з канделільським воском, який розтікається та не тримає форму. Тому для подальших досліджень використовували саме карнаубський віск.

В якості сонцезахисного компоненту в базовому рецепті пропонується застосовувати оксибензон (INCI – Benzophenone-3) – хімічний УФ-фільтр, що забезпечує захист від широкого спектру ультрафіолетових променів, включаючи УФ-В та короткохвильові УФ-А промені. Ця речовина дуже часто використовується у складі сонцезахисної косметики. Як сонцезахисний крем, він поглинає ультрафіолетове випромінювання на шкірі і перетворює його на тепло, яке потім виділяється шкірою. Однак в останні роки підвищена увага приділяється впливу оксибензону на довкілля та наше здоров’я. Він вважається небезпечним подразником очей, також відомий тим, що спричиняє алергію на шкірі. Дослідження показують, що оксибензон є основним фактором знебарвлення коралів. Щодо людей, вважають, що оксибензон збільшує ймовірність розвитку раку та порушує гормональний фон (впливаючи на обмін речовин, зростання та розмноження). Хоча останні дані значною мірою ґрунтуються на дослідженнях на тваринах, тому їх клінічна значимість оспорюється [10].

Внаслідок негативних властивостей оксибензону як сонцезахисний компонент обрали хімічний фільтр – октилметоксициннамат (INCI – Ethylhexyl Methoxycinnamate) – надійний косметичний УФ-фільтр, олієрозчинний компонент, який, як стверджують літературні джерела, є ідеальним агентом для сухих олій та щільних бальзамів, та напрочуд легко вводиться в такі формули [11]. Для порівняння було обрано фізичний фільтр – оксид цинку олієдиспергований (INCI – Zinc oxide) – порошкоподібний сонцезахисний компонент, який широко використовується через його здатність блокувати УФ-промені, що робить його звичайним інгредієнтом при виробництві сонцезахисної косметики [12].

Встановлено, що одержані бальзами дещо відрізняються за зовнішнім виглядом (рис. 1).



а *б*

Рис. 1. Бальзами для губ: а – бальзам із циннаматом; б – бальзам із оксидом цинку

Так, бальзам із циннаматом мав жовтуватий відтінок та відрізнявся більш щільною консистенцією. Бальзам із оксидом цинку більш блідого кольору та трохи рідкіший за консистенцією Обидва бальзами мають гладеньку поверхню, без крупинок та будь-яких включень.

Для того, щоб одержаний бальзам мав не тільки корисні, але й декоративні властивості, до складу бальзамів додавали міку косметичну марок Sunset Pink Mica та Apple Blossom (рис. 2).



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Бальзами для губ із мікою косметичною: *а* – бальзам із циннаматом та мікою Sunset Pink Mica; *б* – бальзам із оксидом цинку та мікою Sunset Pink Mica; *в* – бальзам із циннаматом та мікою Apple Blossom; *г* – бальзам із оксидом цинку та мікою Apple Blossom

Проведено дослідження органолептичних властивостей одержаних бальзамів для губ та визначено якість мазку. Результати досліджень якості бальзамів у порівнянні з вимогами, що висувають до бальзамів для губ, наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Органолептичні показники виготовлених зразків бальзамів для губ

Показник	Бальзам із циннаматом та мікою Sunset Pink Mica	Бальзам із оксидом цинку та мікою Sunset Pink Mica	Бальзам із циннаматом та мікою Apple Blossom	Бальзам із оксидом цинку та мікою Apple Blossom
Зовнішній вигляд	Поверхня гладенька, однорідна, рівномірно забарвлена	Поверхня гладенька, однорідна, рівномірно забарвлена	Поверхня гладенька, однорідна, рівномірно забарвлена	Поверхня гладенька, однорідна, рівномірно забарвлена
Колір	Властивий тону даного найменування, червоно-коричневий	Властивий тону даного найменування, світло-рожевий	Властивий тону даного найменування, перламутрово- коричневий	Властивий тону даного найменування, світло-коричневий
Мазок	Рівний, однорідний	Рівний, однорідний	Рівний, однорідний	Рівний, однорідний
Запах	Приємний, виражений аромат кориці та ванілі	Приємний, виражений аромат кориці та ванілі	Приємний, виражений аромат кориці та ванілі	Приємний, виражений аромат кориці та ванілі

Одержані дані свідчать, що всі приготовані бальзами відповідають вимогам, що висувають до бальзамів для губ за нормативною документацією. Слід зазначити, що бальзами, одержані з додаванням октилметоксициннамату, мають більш інтенсивний відтінок. Всі бальзами мають приємний аромат завдяки додаванню ефірних олій.

В роботі визначали покривну здатність одержаних бальзамів для губ. Результати наведені на рис. 3.

Встановлено, що всі зразки мають однорідну консистенцію, грудочок та крупинок при розтиранні не відчувається.



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Визначення якості мазку бальзамів для губ із мікою косметичною: а – бальзам із циннаматом та мікою Sunset Pink Mica; б – бальзам із оксидом цинку та мікою Sunset Pink Mica; в – бальзам із циннаматом та мікою Apple Blossom; г – бальзам із оксидом цинку та мікою Apple Blossom

В результаті проведеного дослідження одержано бальзами для губ (рис. 4), що мають гарний колір, приємний аромат, є нешкідливими для губ завдяки використанню натуральних компонентів та відрізняються комплексом корисних властивостей.

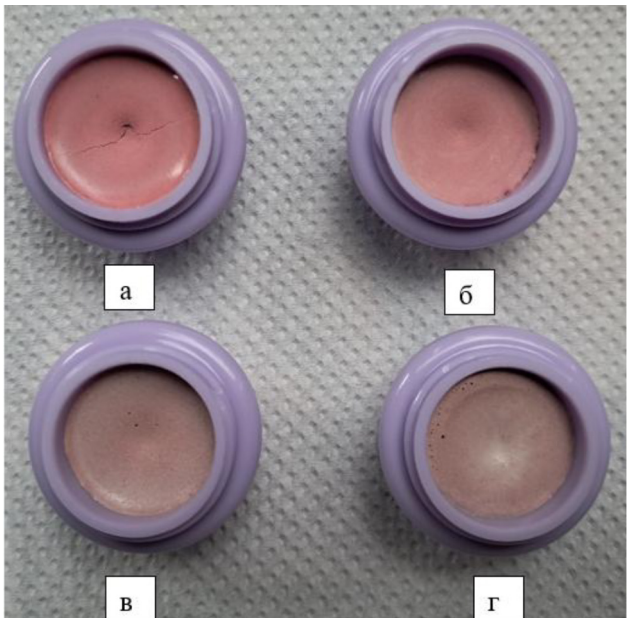


Рис. 4. Бальзами для губ із мікою косметичною: *а* – бальзам із циннаматом та мікою Sunset Pink Mica; *б* – бальзам із оксидом цинку та мікою Sunset Pink Mica; *в* – бальзам із циннаматом та мікою Apple Blossom; *г* – бальзам із оксидом цинку та мікою Apple Blossom

Висновки

1. Розроблено рецептуру приготування сонцезахисного бальзаму для губ. Показано можливість введення до складу бальзаму для надання сонцезахисного ефекту фізичного та хімічного УФ-фільтрів, а також забарвлюючих речовин – міки косметичної Sunset Pink Mica та Apple Blossom.
2. Визначено органолептичні характеристики приготованого засобу. Одержані дані говорять про те, що всі приготовані бальзами відповідають вимогам, що висувають до бальзамів для губ за нормативною документацією.
3. При визначенні покривної здатності встановлено, що всі зразки мають однорідну консистенцію, не відчувається грудочок та крупинок при розтиранні.

Список використаної літератури

1. Skinification: A Game-Changer in Sunscreen Usage. URL: https://www.euromonitor.com/article/skinification-a-game-changer-in-sunscreen-usage
2. Усе, що треба знати про захист від сонця. URL: https://www.village.com.ua/village/service-shopping/beauty/285215-sun-screen
3. Nareswari T. L., Syafitri E., Nurjannah O. Sunscreen lip balm stick formulation containing a combination of virgin coconut oil and crude palm oil. *Pharmacy Reports*. 2022, Vol. 2. https://doi.org/10.51511/pr.48
4. Sunscreen Lip Balm Market Insights. URL: https://www.verifiedmarketreports.com/product/sunscreen-lip-balm-market/
5. Декоративна косметика для губ. Анатомія помад. URL: https://safetymakeup.com.ua/articles/dekoratyvna-kosmetyka-dlia-hub
6. Vivek P. Chavda, Devarshi Acharya, Vivek Hala, Shilpa Daware, Lalitkumar K. Vora. Sunscreens: A comprehensive review with the application of nanotechnology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023, Vol. 86, 104720. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104720
7. Фізичні та хімічні SPF фільтри в санскрінах. URL: https://safetymakeup.com.ua/articles/spf_filters
8. Ефірна олія кориці. URL: https://inveran.com.ua/catalog/korici-kasii-efirna-oliya-vidp-ph-eur-naturalna.html
9. Ефірна олія ванілі – властивості, корисності. URL: https://www.busichka.com/uk/vanilla-essential-oil/
10. Технічний регламент на косметичну продукцію. URL: https://ucps.com.ua/build/files/technical_regulation_cosmetics.pdf
11. 2-Ethylhexyl 4-methoxycinnamate. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2-Ethylhexyl-4-methoxycinnamate

References

1. Skinification: A Game-Changer in Sunscreen Usage. URL: https://www.euromonitor.com/article/skinification-a-game-changer-in-sunscreen-usage
2. Use, sho treba znati pro zahist vid soncya. URL: https://www.village.com.ua/village/service-shopping/beauty/285215-sun-screen
3. Nareswari T. L., Syafitri E., Nurjannah O. (2022) Sunscreen lip balm stick formulation containing a combination of virgin coconut oil and crude palm oil. *Pharmacy Reports*. 2022, Vol. 2. https://doi.org/10.51511/pr.48 [in English].
4. Sunscreen Lip Balm Market Insights. URL: https://www.verifiedmarketreports.com/product/sunscreen-lip-balm-market/
5. Dekorativna kosmetika dlya gub. Anatomiya pomad. URL: https://safetymakeup.com.ua/articles/dekoratyvna-kosmetyka-dlia-hub
6. Vivek P. Chavda, Devarshi Acharya, Vivek Hala, Shilpa Daware, Lalitkumar K. Vora. (2023) Sunscreens: A comprehensive review with the application of nanotechnology. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2023, Vol. 86, 104720. https://doi.org/10.1016/j.jddst.2023.104720 [in English].
7. Fizichni ta himichni SPF filtri v sanskrinah. URL: https://safetymakeup.com.ua/articles/spf_filters
8. Efirna oliya korici. URL: https://inveran.com.ua/catalog/korici-kasii-efirna-oliya-vidp-ph-eur-naturalna.html
9. Efirna oliya vanili – vlastivosti, korisnosti. URL: https://www.busichka.com/uk/vanilla-essential-oil/
10. Tehnichnij reglament na kosmetichnu produkciyu. URL: https://ucps.com.ua/build/files/technical_regulation_cosmetics.pdf
11. 2-Ethylhexyl 4-methoxycinnamate. URL: https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/2-Ethylhexyl-4-methoxycinnamate

НОТАТКИ

ВІСНИК

Херсонського національного технічного університету

Відповідальний за випуск	головний редактор Литвиненко В.І. д.т.н., професор, завідувач кафедри інформатики і комп'ютерних наук, заслужений діяч науки і техніки України
Комп'ютерна верстка	Клименко Т. О.
Відповідальний секретар	Лур'є І.А. к.т.н., доцент, начальник навчально-методичного відділу, доцент кафедри інформатики і комп'ютерних наук

Підписано до друку 26.02.2025.
Формат 60x84/8. Гарнітура Times New Roman. Папір офсет. Цифровий друк.
Ум. друк. арк. 40,92. Замов. № 0425/322. Наклад 100 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.