

І. Л. МИХЕЛЄВ

кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри інформаційних управляючих систем і технологій
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0001-9579-6547

Ю. О. КАЗИМИРЕНКО

доктор технічних наук, доцент,
професор кафедри інформаційних управляючих систем і технологій
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
ORCID: 0000-0002-7120-8226

М. А. МАТВЄЄВ

провідний інженер-конструктор
ДПНВКГ «Зоря»-«Машпроект»
ORCID: 0000-0001-8221-1693

АЛГОРИТМ ОБМІНУ ДАНИМИ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ У ГАЗОТУРБІННИХ КАМЕРАХ ЗГОРЯННЯ

Актуальність тематики роботи пов'язана з підвищенням точності розрахункових моделей у енергетичному машинобудуванні, зокрема під час досліджень теплових процесів у камерах згоряння газотурбінних двигунів. При модернізації конструкцій виникають проблемні питання, пов'язані із зіставленням результатів числового моделювання і експериментальних випробувань в існуючих і удосконалених проєктах, що можна розглядати як некоректно поставлену задачу. Мета роботи – дослідження, розробка і верифікація алгоритму обміну розрахунковими та експериментальними даними температурних параметрів у камерах згоряння газотурбінних двигунів. Методологія дослідження ґрунтується на системному підході до проєктування камери згоряння як складної технічної системи, методах розв'язування некоректно поставлених задач, методах і моделях візуалізації розподілу температурних полів у газотурбінних камерах згоряння. Для розрахунків застосовано моделі доменів твердого тіла з жаростійкого сплаву та газоподібного багатокомпонентного середовища. Експериментальні випробування полягали у вимірюванні значень температур газу та твердого тіла. Складений алгоритм обміну розрахунковими і експериментальними даними температурних параметрів апробовано на прикладі аналізу теплового стану жарової труби. Результати представлені у вигляді побудованих радіальних і окружних епюр. Верифікація алгоритму полягатиме у зіставленні температурних полів з еталонними даними. Наукова новизна роботи полягатиме у новому методичному підґрунті дослідження фізичних процесів у камерах згоряння газотурбінних двигунів, що реалізовано на прикладі алгоритму обміну даними між твердотільним і газовим середовищами; практична цінність пов'язана з впровадженням результатів досліджень у виробничу діяльність машинобудівного підприємства. Одержані в роботі результати спрямовані на вирішення важливої науково-прикладної проблеми роботи з багатомірними даними при вирішенні складних інженерних задач. Перспективи подальших досліджень авторів полягатимуть у розв'язанні нових типів задач для енергетичного машинобудування за допомогою комп'ютерного моделювання фізичних процесів.

Ключові слова: верифікація, домени розрахункової області, некоректні зворотні задачі, моделювання фізичних процесів, енергетичне машинобудування.

I. L. MYKHELIEV

Ph.D., Associate Professor,
Head of the Department of Information Control Systems and Technologies
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0001-9579-6547

YU. O. KAZYMYRENKO

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,
Professor at the Department of Information Control Systems and Technologies
Admiral Makarov National University of Shipbuilding
ORCID: 0000-0002-7120-8226

M. A. MATVYEV

Lead of Team Engineer
of GTR&DC “Zorya”–“Mashproekt”
ORCID: 0000-0001-8221-1693

ALGORITHM OF DATA EXCHANGE IN SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN GAS TURBINE COMBUSTION CHAMBERS

The relevance of the topic of the work is associated with increasing the accuracy of computational models in power engineering, in particular during the study of thermal processes in the combustion chambers of gas turbine engines. When modernizing structures, problematic issues arise related to the comparison of the results of numerical modeling and experimental tests in existing and improved projects, which can be considered as an incorrectly set task. The purpose of the work is to study, develop and verify an algorithm for the exchange of calculated and experimental data on temperature parameters in the combustion chambers of gas turbine engines. The methodology of the study is based on a systematic approach to the design of the combustion chamber as a complex technical system, methods for solving incorrectly set tasks, methods and models for visualizing the distribution of temperature fields in gas turbine combustion chambers. For the calculations, models of solid domains made of heat-resistant alloy and gaseous multicomponent medium were used. The experimental tests consisted of measuring the temperature values of the gas and the solid. The algorithm for the exchange of calculated and experimental data of temperature parameters was tested on the example of the analysis of the thermal state of the flame tube. The results are presented in the form of constructed radial and circumferential diagrams. Verification of the algorithm will consist in comparing temperature fields with reference data. The scientific novelty of the work lies in the new methodological basis for the study of physical processes in the combustion chambers of gas turbine engines, which is implemented on the example of the algorithm of data exchange between solid-state and gas media; The practical value is associated with the implementation of research results in the production activities of a machine-building enterprise. The results obtained in the work are aimed at solving an important scientific and applied problem of working with multidimensional data in solving complex engineering problems. Prospects for further research of the authors will be to solve new types of problems for power engineering using computer modeling of physical processes.

Key words: verification, computational domain domains, incorrect inverse problems, modeling of physical processes, power engineering.

Постановка проблеми

Камера згоряння газотурбінного двигуна є відповідальним конструктивним елементом, де водночас протікають декілька складних фізичних процесів: сумішоутворення, згоряння, тепло- і масообміну і завихрення потоків повітря [1, с. 27–33]. Це дозволяє розглядати її як складну технічну систему [2, с. 37–41] з пріоритетними дослідженнями фізичних, а саме теплових процесів. Модернізація конструкції камери згоряння передбачатиме постановку великої кількості стендових випробувань, обчислені результати яких не завжди відповідатимуть технічному проекту. Науково-практичний досвід авторів показав, що порівняння результатів чисельного моделювання теплових процесів вихідних варіантів і результатів натурних вимірювань параметрів удосконалених конструкцій на експериментальному стенді є проблемним питанням і може бути розглянуто як некоректно поставлена задачу [3, с. 37–42].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженням моделей теплових об'єктів присвячено роботи [1; 4–7]. Авторами статті [1, с. 27–33] застосовано методи математичного моделювання з постановкою числових експериментів та використанням CFD-пакетів. Проте у виробничій реальності нерівномірність розподілу температур призводить до збільшення розрахункових похибок, що суттєво ускладнює конструкторські задачі. В науковій статті [4, с. 68–77] дослідження сконцентровані на експлуатаційному питанні з підтримки технічного стану газотурбінної камери згоряння, що контролюється сумарною концентрацією оксидів азоту і середньоквадратичним значенням віброшвидкості корпусу. Для

вирішення поставленої задачі в роботі застосовуються нейромережі Кохонена та засади генетичних алгоритмів. В роботах [5, с. 36–41; 6, с. 15–22] увагу авторів зосереджено на візуалізації вимірювань температур під час випробувань камер згоряння. Для вирішення завдання запропоновано нові принципи алгоритмічної автоматизації побудови плоских ізотерм та розроблено програмний застосунок мовою *Common Lisp* [8, с. 117–129]. Це дає змогу конструкторові обирати найкраще конструктивно-композувальне рішення.

На практиці існує багато ситуацій, коли похибка математичної моделі пов'язана з її невідповідністю фізичної реальності. У таких випадках задачу можна розглянути як некоректно поставлену (нестійку) [3, с. 37–42] і для її розв'язання використовується методологія алгоритмічного уточнення вихідних обчислювальних даних, чому присвячено роботи [3; 7; 9]. В роботі [7, с. 19–26] авторами розглянуто математичне моделювання теплових об'єктів, а саме обернену некоректно поставлену задачу для рівняння теплопровідності. Для випадкових непрямих вимірювань з перервними або відновлювальними результатами доцільно розв'язувати дискретні некоректні задачі, як це доведено в роботі [9, с. 16–27], де авторка пропонує використовувати метод випадкових проєкцій, що показує мінімальну похибку при порівнянні теоретичних і експериментальних результатів.

На підставі проведеного огляду аналізу наукових робіт слід зазначити необхідність індивідуального підбору методів розв'язання некоректних задач для досліджень фізичних процесів у енергетичному об'єкті під конкретне інженерно-конструкторське завдання, що обов'язково повинно підкріплюватися експериментальними результатами.

Формулювання мети роботи

Мета роботи – дослідження, розробка і верифікація алгоритму обміну розрахунковими та експериментальними даними температурних параметрів у камерах згоряння газотурбінних двигунів.

Викладання основного матеріалу дослідження

В основу постановки досліджень покладено системний підхід [10, с. 43–47] до моделювання фізичних процесів у складних технічних системах [2, с. 73–87] за критеріями подібності; наукові уявлення про термодинамічні процеси і цикли газотурбінних установок [11, с. 139–158]; методи ідентифікації з використанням комп'ютерної техніки для синтезу математичних моделей хіміко-технологічних об'єктів управління [12, с. 102–110]; методи і моделі візуалізації розподілу температурних полів газотурбінних камер згоряння [5, с. 36–41; 6, с. 15–22].

Теоретичні дослідження. Традиційні алгоритми обміну даними будуються на спрощених *CFD*-моделях і постановці числових експериментів для різних варіантів геометрії розрахункової області. В роботі висунуті пропозиції щодо формування окремих доменів у розрахункових областях твердотілого середовища (конструкції камери згоряння), газоподібного середовища (із суміші компонентів CH_4 , CO , CO_2 , H_2O , NO , O_2) і на поверхні їх поділу, що сприятиме підвищенню точності розрахунків. Етапи і методологія теоретичних досліджень наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Теоретичні дослідження: етапи і методологія

Етап дослідження	Методи і засоби
Побудова геометричної моделі камери згоряння	Системи автоматизованого проєктування з використанням хмарних технологій [13, с. 45–60]
Виділення доменів розрахункової області	Введення характеристик лінійних алгебраїчних систем [3, с. 37–41]
Формування розрахункових доменів газоподібного і твердотілого середовища та на їх поверхні поділу	Пристосування доменів плавучості та руху доменів з можливістю деформування розрахункових комірок [14, с. 57–69], моделі теплопередачі у твердому тілі [11, с. 453–457] конвективного теплообміну [11, с. 370–385]
Порівняння розрахункових і експериментальних результатів	Узагальнення розв'язку рішення з визначенням псевдорозв'язком [2, с. 48–50]
Розробка програмного застосунку	Мова програмування <i>Common Lisp</i> [8, с. 117–129]
Верифікація алгоритму	Аналіз похибок обчислень [2, с. 42–47] з визначенням виродженості системи

Для побудови геометричної моделі спрощеної конфігурації з конструкції камери згоряння виключено отвори і тракти проходу повітря робочого середовища, фаски та зварні з'єднання, труби підводу олії до підшипників тощо. Граничними умовами моделювання фізичних процесів обрано режими номінальної потужності двигунів з середніми температурами матеріал стінки жарової труби у зоні горіння на рівні 500...600 °С. Виходячи з цього, виділено домени розрахункової області (рис. 1). Для розрахунків застосовано моделі доменів твердого тіла з жароміцного сплаву марки ХН60ВТ та газоподібного середовища з компонентами сумішей CH_4 , CO , CO_2 , H_2O , NO , O_2 . Модель домену на поверхні поділу між ними розглядає перенос тепла та враховує шорсткість стінки твердого тіла.

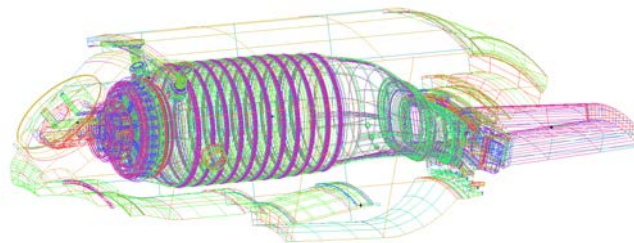


Рис. 1. Сітчаста будова моделі розрахункової області

Експериментальні дослідження полягали у фіксації значень температур газу на виході із жарової труби. За допомогою спеціальних моніторів проводились вимірювання повної температури, тиску і проєкції швидкості на вісь X , схему вимірювань наведено на рис. 2.

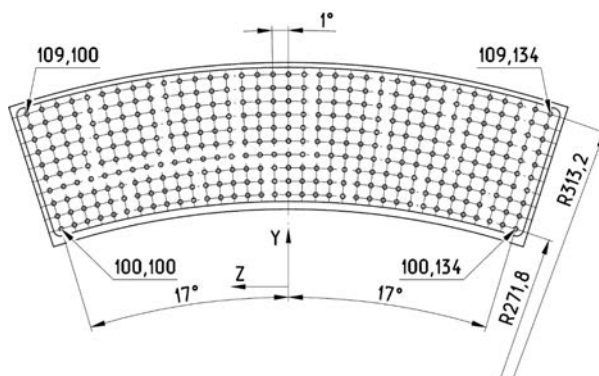


Рис. 2. Вимірювання температури газу на виході із жарової труби

Для визначення матеріалу жарової труби у контрольних точках додатково було встановлено термопари.

Результати обчислювали за авторською методикою, викладеною у роботах [5, с. 36–41; 6, с. 15–22], за якою також визначались еталонні значення для подальшої верифікації алгоритму (рис. 3). Розроблений алгоритм виключає застосування для розрахунків миттєвих значень температур. Завдяки обміну розрахунковими і експериментальними даними процес моделювання теплового стану у більшій мірі відповідає фізичній реальності, що дає можливість підібрати раціональні конструкторські рішення. Застосування функціональної мови Common Lisp [8, с. 117–129] для розробки програмного застосунку забезпечує зручність роботи з багатовимірними і динамічними масивами та дає можливість компактного описання операцій обробки списків.



Рис. 3. Алгоритм обміну розрахунковими і експериментальними даними температурних параметрів у камерах згоряння газотурбінних двигунів

Складений алгоритм обміну розрахунковими і експериментальними даними температурних параметрів апробовано на прикладі аналізу теплового стану жарової труби. Як приклад, за допомогою графічного редактора *Gnuplot* побудовано радіальні і окружні епюри відносних температур на виході з жарових труб кільцевої камери згоряння газотурбінного двигуна. На рис. 4 максимальні температури зображені пунктирними лініями, середні температури – сполосними.

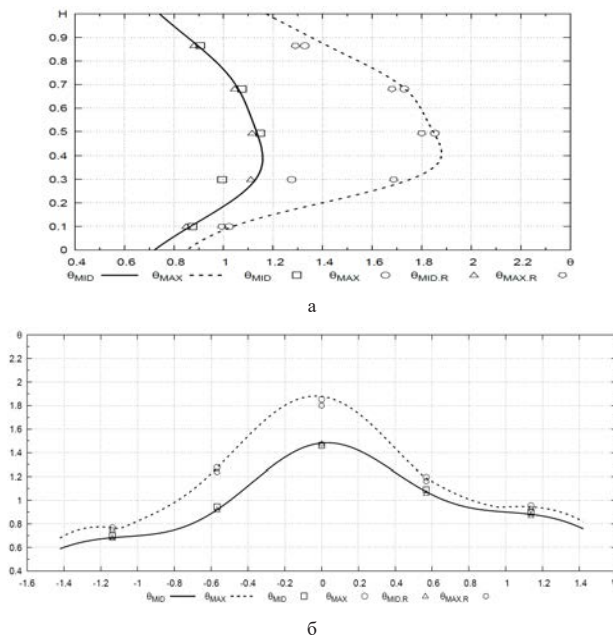


Рис. 4. Епюри максимальних і середніх відносних температур на виході з кільцевої камери згоряння: а – радіальна епюра; б – окружна епюра

Наукова новизна роботи полягатиме у новому методичному підґрунті дослідження фізичних процесів у камерах згоряння газотурбінних двигунів, що реалізовано на прикладі алгоритму обміну даними між твердотільним і газовим середовищами; **практична цінність** пов'язана з впровадженням результатів досліджень у виробничу діяльність машинобудівного підприємства. Одержані в роботі результати спрямовані на вирішення важливої **науково-прикладної проблеми** роботи з багатовимірними даними при вирішенні складних інженерних задач.

Перспективи подальших досліджень авторів полягатимуть у розв'язанні нових типів задач для енергетичного машинобудування за допомогою комп'ютерного моделювання фізичних процесів.

Висновки

Проблемним питанням під час модернізації конструkcії виявилось порівняння результатів чисельного моделювання теплових процесів вихідних варіантів і результатів натурних вимірювань параметрів удосконалених конструkcій на експериментальному стенді, що можна розглядати як некоректно поставлену задачу.

Методологія дослідження ґрунтується на системному підході до проектування камери згоряння як складної технічної системи, методах розв'язування некоректно поставлених задач, методах і моделях візуалізації розподілу температурних полів у газотурбінних камерах згоряння.

Теоретичні дослідження включатимуть у себе побудову спрощеної геометричної моделі камери згоряння, виділення і формування розрахункових доменів газоподібного і твердотільного середовищ з поверхнею поділу, порівняння розрахункових і експериментальних результатів, розробку програмного застосунку мовою *Common Lisp* та верифікацію алгоритму.

Експериментальні випробування полягали у вимірюванні значень температур газу та твердого тіла. Складений алгоритм обміну розрахунковими і експериментальними даними температурних параметрів апробовано на прикладі аналізу теплового стану жарової труби; результати представлені у вигляді побудованих радіальних і окружних епюр.

Список використаної літератури

1. Діасамідзе Б. Т., Вілкул С. В., Сербін С. І. Теоретичні дослідження двопаливної низькоемісійної камери згоряння газотурбінного двигуна. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2019. 1. С. 27–33.
2. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О. Теорія технічних систем: навч. посіб. Київ, ЦП «КОМПРИНТ». 2017. 291 с.
3. Охріменко М. Г., Жуковська О. А., Купка О. О. Методи розв'язування некоректно поставлених задач: навч. посіб. Київ, Цент учбової літератури. 2008. 166 с.
4. Горбійчук М. І., Біла О. Т., Лазарів Н. Т., Лазарів А. М. Метод оцінки технічного стану камери згоряння газотурбінної установки на засадах штучного інтелекту. *Методи та прилади контролю якості*. 2019. 2 (43). С. 68–77.
5. Казимиренко Ю., Михелєв, І., Матвєєв М. Методи і моделі візуалізації розподілу температурних полів газотурбінних камер згоряння з використанням середовища *Common Lisp*. *Інформаційні технології та суспільство*. 2022. 2 (4). С. 36–41.
6. Казимиренко, Ю., Михелєв, І., Матвєєв, М. Систематизація та візуалізація експериментальних випробувань газотурбінних камер згоряння з використанням середовища *Common Lisp*. *Інформаційні технології та суспільство*, 2023. 1 (7). С. 15–22.
7. Верлань А. Ф., Федорчук В. А. Математичні моделі для задачі відновлення функції розподілу теплових джерел. *Математичне і комп'ютерне моделювання. Серія: Фізико-математичні науки*. 2021. Вип. 22. С. 19–26.
8. Сторчак І. М., Іванов О. П. Аналіз механізмів та ефективності спеціалізованих мов функціонального програмування. *Наука і прогрес транспорту. Вісник Дніпровського національного університету залізничного транспорту*. 2019. 6 (84). С. 117–129.
9. Ревунова О. Г. Дослідження точності розв'язання дискретних некоректних задач методом випадкових проєкцій. *Control systems and computers*. 2018. 1. С. 16–27.
10. Варенко В. Методи системного аналізу в аналітиці. *Вісник Книжкової палати*. 2019. 10. С. 43–47.
11. Вассерман О. А., Слинко О. Г. Технічна термодинаміка і теплообмін : підруч. Одеса, Фенікс. 2019. 496.
12. Левчук І. Л., Манко Г. І., Тришкін В. Я., Корсун В. І. Теорія і практика ідентифікації об'єктів управління : монографія. Дніпро, ДВНЗУДТТУ. 2019. 203 с.
13. Смірнова Т. В., Поліщук Л. І., Смірнов О. А., Буравченко К. О., Макєвнн А. О. Дослідження хмарних технологій і сервісів. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2020. 3 (7). С. 43–60.
14. Константінов Ю. М., Гіжа О. О. Технічна механіка рідини газу : підруч. Київ, 2002. 277 с.

References

1. Diasamidze, B. T., Vilkul, S. V., Serbin, S. I. (2019). Teoretychni doslidzhennia dvopalyvnoi nyzkoemisiianoi kamery zghoriannia hazoturbinnoho dvyhuna [Theoretical investigations of a dual-fuel low-emission gas turbine combustor]. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Ser.: Enerhetychni ta teplotekhnichni protsesy y ustatkuvannia*.

Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : Power and Heat Engineering Processes and Equipment. no 1, pp. 27–33 DOI: 10.20998/2078-774X.2019.01.04

2. Loveikin, V. S., Romasevych, Yu. O. (2017). Teoriia tekhnichnykh system: navch. posib. [Theory of technical systems]. Kyiv, TsP «KOMPRYNT» [in Ukrainian].

3. Okhrimenko M. H., Zhukovska O. A., Kupka O. O. (2008). Metody rozviazuvannya nekorektno postavlennykh zadach: navch. posib. [Methods of solving incorrectly set problems]. Kyiv, Tsent uchbovoi literatury [in Ukrainian].

4. Horbiichuk M. I., Bila O. T., Lazariv N. T., Lazariv A. M. (2019). Metod otsinky tekhnichnoho stanu kamery zghoriannia hazoturbinnoi ustanovky na zasadakh shtuchnoho intelektu [Method for assessing the technical condition of the combustion chamber of a gas turbine plant based on artificial intelligence]. *Metody ta prylady kontroliu yakosti.* no 2(43), pp. 68–77. DOI: 10.31471/1993-9981-2019-2(43)-68-77

5. Kazymyrenko, Yu., Mikheliev, I., Matvieiev, M. (2022) Metody i modeli vizualizatsii rozpodilu temperaturnykh poliv hazoturbinnykh kamer zghoriannia z vykorystanniam seredovyshcha Common Lisp [Methods and models for visualization of temperature field distribution of gas turbine combustion chambers using Common Lisp]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo.* no 2 (4), pp. 36–41. DOI: 10.32689/maup.it.2022.2.5

6. Kazymyrenko, Yu., Mikheliev, I., Matvyeyev, M. (2023). Systematyzatsiia ta vizualizatsiia eksperymentalnykh vyprobuvan hazoturbinnykh kamer zghoriannia u seredovyshchi Common Lisp [Systematization and visualization of experimental tests of gas turbine combustion chambers in the Common Lisp environment]. *Informatsiini tekhnologii ta suspilstvo.* no. 1(7), pp. 15–22. DOI: 10.32689/maup.it.2023.1.4

7. Verlan A. F., Fedorchuk V. A. (2021). Matematychni modeli dlia zadachi vidnovlennia funktsii rozpodilu teplovykh dzherel [Mathematical Models for the Problem of Restoring the Distribution Function of Heat Sources]. *Matematychni i kompiuterne modeliuвання. Serii: Fizyko-matematychni nauky.* vyp. 22, pp. 19–26. DOI: 10.32626/2308-5878.2021-22. 19–26.

8. Storchak I. M., Ivanov O. P. (2019). Analiz mekhanizmiv ta efektyvnosti spetsializovanykh mov funktsionalnoho prohramuvannia [Analysis of mechanisms and efficiency of specialized languages of functional programming]. *Nauka i prohres transportu. Visnyk Dniprovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu.* no 6(84), pp. 117–129. DOI: 10.15802/stp2019/195581

9. Revunova O. H. (2018). Doslidzhennia tochnosti rozviazannia dyskretnykh nekorektnykh zadach metodom vypadkovykh proiektzii [Investigation of the accuracy of solving discrete ill-posed problems by the method of random projections]. *Control systems and computers.* no 1, pp. 16–27. DOI: <https://doi.org/10.15407/usim.2018.01.016>

10. Varenko V. (2019). Metody systemnoho analizu v analitytsi [Methods of System Analysis in Analytics] *Visnyk Knyzhkovoii palaty.* no 10, pp. 43–47. DOI: 10.36273/2076-9555.2019.10(279)

11. Vasserman O. A., Slynko O. H. (2019). Tekhnichna termodynamika i teploobmin : pidruch [Technical Thermodynamics and Heat Transfer]. Odesa, Feniks [in Ukrainian].

12. Levchuk I. L., Manko H. I., Tryshkin V. Ya., Korsun V. I. (2019). Teoriia i praktyka identyfikatsii obiektiv upravlinnia : monohrafiia [Theory and Practice of Identification of Management Objects]. Dnipro, DVNZUDTTU [in Ukrainian].

13. Smirnova T. V., Polishchuk L. I., Smirnov O. A., Buravchenko K. O., Makevnin A. O. (2020). Doslidzhennia khmarnykh tekhnologii i servisiv [Research on Cloud Technologies and Services]. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika.* no 3(7), pp. 43–46. DOI: 10.28925/2663-4023.2020.7.4362

14. Konstantinov Yu. M., Hizha O. O. (2002). Tekhnichna mekhanika ridyny hazu : pidruch [Technical Mechanics of Liquid Gas]. Kyiv, 2002 [in Ukrainian].