

В.С. ЦАПАР, Д.М. СКЛАДАННИЙ, О.О. КВІТКА,
С.М. ТКАЧУК, В.В. БОНДАР
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА КОМПЛЕКСНИМ КРИТЕРІЄМ ОПТИМАЛЬНОСТІ ПРОЦЕСУ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ НАФТИ

У статті розглядається проблема керування процесом первинної підготовки нафти. Проведений аналіз попередніх досліджень виявив невирішений аспект загальної проблеми: відсутність інтеграції динамічних математичних моделей із багатокритеріальною оптимізацією для автоматизованих систем керування, здатною ефективно враховувати нелінійні ефекти та технологічні збурення в реальному часі. Існуючі моделі, як правило, зосереджено на стаціонарних режимах або ж використовують багатокритеріальну оптимізацію без достатнього динамічного зв'язку. Метою роботи є розроблення математичної моделі динаміки процесу первинної обробки нафти та визначення інтегрального критерію оптимальності для синтезу систем керування. Цей критерій забезпечує ефективний баланс між енергоефективністю, якістю підготовленої нафти та економічними показниками виробництва. Для досягнення поставленої мети запропоновано динамічну модель процесу, що об'єднує рівняння теплового балансу, кінетичне рівняння та модифіковане рівняння в'язкості.

У дослідженні пропонується використання узагальненого інтегрального критерію оптимальності, який включає у себе якість зневоднення, обмеження за вмістом солей, а також загальні енерговитрати, що складаються з теплового та електричного складників. На основі експертних оцінок отримано нормалізований вектор вагових коефіцієнтів. Сформовано задачу динамічної оптимізації, яку розв'язано із застосуванням генетичного алгоритму в середовищі Python, із застосуванням методу прямої колокації. Оптимізація проводилася для трьох типів нафти: легкої, середньої, важкої з різними початковими умовами та в рамках технологічних обмежень за температурою.

Запропонований підхід дає змогу визначити оптимальну траєкторію зміни температури в електродегідраторі в часі. Це дає змогу досягти зниження енергетичних витрат на 15–25% із більшим ефектом для важких нафт, при цьому гарантовано досягається цільове значення вмісту води менше 0,1%. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення енергоефективності та якості продукції нафтопереробних підприємств.

Ключові слова: математичне моделювання, оптимізація, нафтопереробка, автоматичне керування, критерій якості.

V.S. TSAPAR, D.M. SKLADANNYY, O.O. KVITKA,
S.M. TKACHUK, V.V. BONDAR
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

MODELLING AND OPTIMISATION BASED ON A COMPREHENSIVE OPTIMALITY CRITERION THE PRIMARY OIL REFINING PROCESS

The article discusses the control of the primary oil treatment process. An analysis of previous studies revealed an unresolved aspect of the general problem: the lack of a dynamic mathematical model integrated with multi-criteria optimisation for automated control systems capable of effectively accounting for nonlinear effects and technological disturbances in real time. Existing models tend to focus on steady-state modes or use multi-criteria optimisation without sufficient dynamic coupling. The aim of this work is to develop a dynamics mathematical model of the primary oil treatment process and to determine an integral criterion of optimality for the control systems synthesis. This criterion provides an effective balance between energy efficiency, the quality of the prepared oil, and economic production indicators. To achieve this aim, a process dynamic model is proposed, combining the heat balance equation, the kinetic equation, and the modified viscosity equation.

In the research it is suggested to use a generalised integral optimality criterion, which aggregates the dewatering quality, restrictions on salt content, and total energy consumption, consisting of thermal and electrical components. Based on expert assessments, a normalised vector of weight coefficients is obtained. A dynamic optimisation problem is formulated, which was solved by a genetic algorithm that realised using in the Python environment, using the direct collocation method. Optimisation is carried out for three types of oil: light, medium, and heavy, with different initial conditions and within technological temperature constraints.

The proposed approach allows determining the optimal trajectory of temperature change in the electric dehydrator over time. This allows us to achieve a 15–25% reduction in energy costs with a greater effect for heavy oils, while guaranteeing the target water content less than 0,1%. The results can be used to improve energy efficiency and product quality of oil refineries.

Key words: mathematical modelling, optimisation, oil refining, automatic control, quality criterion.

Постановка проблеми

Сучасна нафтопереробна промисловість стикається з низкою складних технологічних викликів, серед яких особливої уваги заслуговує проблема нестабільності якості сирової нафти. Коливальний характер фізико-хімічних властивостей сировини, зумовлений різноманіттям родовищ та умов транспортування, істотно ускладнює забезпечення стабільно високих показників ефективності процесів первинної підготовки [1]. Актуальність проблеми полягає у необхідності розроблення адаптивних систем керування, здатних динамічно коригувати технологічні параметри відповідно до мінливих характеристик сировини. Особливо це стосується процесів зневоднення та знесолення, де температура підігріву є критичним параметром [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останнім часом зростає число публікацій із різних аспектів моделювання процесів нафтової промисловості. Частина з них носить більш загальний характер. У [3] розглянуто багатоетапну оптимізацію системи виробництва нафти з матеріальними балансами, а в [4] – оптимізацію розподілу нафтопродуктів через трубопровідні системи. Ці роботи спираються на рівняння балансу, але недостатньо інтегрують багатокритеріальну оптимізацію з динамікою збурень для автоматизованих систем, що є невирішеним аспектом загальної проблеми. Водночас запропоновано низку математичних моделей для опису процесів первинної обробки нафти. Наприклад, у роботі [5] розроблено модель для прогнозування ефективності зневоднення та знесолення в промисловій установці. Автори врахували вплив трьох основних механізмів, які визначають ефективність процесу: гідродинамічні сили, дифузійні механізми та електростатичні механізми. Швидкість коалесценції крапель визначалася за допомогою моделі дренажу плівки. Розроблена модель успішно прогнозує розподіл крапель за розміром на виході з установки, а також ефективність зневоднення та знесолення нафти. Автори [6] запропонували модель електростатичного розділення та двоетапного знесолення на основі рівняння популяційного балансу (*PBE*) для опису процесів формування та зміни розмірів водяних крапель в емульсії. Проте наведена модель розглядає лише стаціонарний режим роботи, ігноруючи перехідні процеси, які є важливими для операторів. Дослідження [7] зосереджено на моделюванні та оптимізації зневоднення і знесолення з урахуванням емульсійних основ, включаючи оптимізацію операційних параметрів. Моделі у [8] також будуються на основі *PBE* з урахуванням процесів коалесценції та руйнування водяних крапель в емульсії. У роботі виконано багатокритеріальну оптимізацію за двома конкуруючими критеріями: максимізацією ефективності видалення солей та мінімізацією експлуатаційних витрат. Результати оптимізації демонструють наявність оптимального Парето-компромісного рішення. Хоча такий підхід є потужним інструментом, практична реалізація Парето-оптимізованих точок на реальному виробництві може бути складною через обмеження обладнання та необхідність безперервного контролю кількох взаємозалежних параметрів. Цікавий підхід до моделювання з перспективою побудови нечіткої системи контролю нафтопереробного підприємства на основі нейронних мереж показано в роботі [9]. Особливої уваги заслуговує робота [10], де показано результати застосування багатокритеріального підходу для вирішення комплексної проблеми вибору найкращого постачальника та розподілу замовлень у нафтовій промисловості в умовах неадекватності та неповноти даних та взаємодії між критеріями. Для визначення ваг критеріїв і рейтингів постачальників застосовується метод аналізу ієрархій, а подальше вирішення завдання ранжування постачальників для оптимального розподілу замовлень здійснюється методом багатоцільового лінійного програмування, який дає змогу отримувати Парето-оптимальні рішення.

Аналізуючи наведені вище дослідження, можна зробити висновок, що невирішеним аспектом загальної проблеми є інтеграція динамічних моделей із багатокритеріальною оптимізацією для автоматизованих систем, що враховують нелінійні ефекти та збурення в реальному часі. Використання методу АНР для вирішення поставленого завдання вбачається перспективним.

Інтеграція рівнянь теплового балансу і кінетики зневоднення для побудови багатокритеріального показника оптимальності дасть змогу підвищити точність моделювання в перехідних режимах порівняно з існуючими моделями [5–10].

Метою дослідження є розроблення математичної моделі динаміки процесу первинної обробки нафти та визначення критерію оптимальності для синтезу автоматизованих систем керування, що забезпечує баланс між енергоефективністю, якістю та економічними показниками.

Виклад основного матеріалу дослідження

Побудова узагальненого критерію оптимальності. Для опису динаміки зміни температури нафти в осушувачі як у теплообмінному апараті запропоновано модель на основі рівняння теплового балансу:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho c_p V} [Q_h - UA(T - T_E)] - mc_p (T_{out} - T_{in}), \quad (1)$$

де T – температура нафти, ρ – густина, c_p – теплоємність, V – об'єм, Q_h – тепловий потік, U – коефіцієнт теплопередачі, A – площа поверхні, T_E – температура довкілля, \dot{m} – масові витрати нафти.

Процес видалення води з нафти описується кінетичним рівнянням:

$$\frac{dW}{dt} = -k_1 W C_d \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) + k_2 E_f \mu(T), \quad (2)$$

де W – уміст води, k_1, k_2 – кінетичні константи, E_a – енергія активації, R – універсальна газова стала, C_d – концентрація деемульгатора, E_f – напруженість електричного поля.

В'язкість нафти, очевидно, залежить від температури й описується модифікованим рівнянням:

$$\mu(T) = A(1 + \alpha_w W) \exp\left(\frac{B}{T + C}\right), \quad (3)$$

де μ – динамічна в'язкість, A, B, C – емпіричні коефіцієнти, α_w – коефіцієнт впливу води, W – уміст води у нафті.

Моделювання проводилося для трьох типів нафти з різними початковими умовами. Легка нафта характеризується початковим умістом води на рівні $5 \div 7\%$, середня – $8 \div 12\%$, важка – $13 \div 15\%$. Як початкове значення у моделюванні прийнято середнє по інтервалах. Значення кінетичних констант та фізико-хімічні характеристики для різних типів нафти за даними [11] наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Значення кінетичних констант та фізико-хімічні характеристики типів нафти

Тип нафти	k_1 (1/с)	k_2 (м ² /В·с)	E_a (Дж/моль)	ρ (кг/м ³)	c_p (Дж/кг·К)	Початковий W (%)
Легка	0.05	1.2×10^{-6}	45000	800	2000	6
Середня	0.03	0.8×10^{-6}	50000	850	2100	10
Важка	0.02	0.5×10^{-6}	55000	900	2200	14

Узагальненим показником оптимальності процесу дегідратації пропонується інтегральна цільова функція, яка об'єднує ключові компоненти процесу:

$$J = \int_0^{t_f} [\alpha P_e + \beta C_d + \gamma (W - W_t)^2 + \delta (S - S_{max})^2] dt, \quad (4)$$

$$P_e = P_{ht} + P_{el},$$

де $W_t = 0.1\%$ – цільове значення вмісту води у нафті, S, S_{max} – поточний та гранично припустимий уміст солей у нафті, P_e – енерговитрати на дегідратацію, які складаються з P_{ht} – витрат теплової енергії та P_{el} – витрат електричної енергії.

Для визначення вагових коефіцієнти $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ пропонується скористатися методом аналізу ієрархій (АНР). Це структурований підхід до багатокритеріального прийняття рішень, розроблений Томасом Сааті [12] і призначений для перетворення складних, часто нечітких та суб'єктивних задач вибору на кількісно оцінену ієрархічну структуру. Ключовим кроком АНР є використання попарних порівнянь на основі шкали Сааті, зазвичай від 1 до 9, що кількісно відображає силу переваги одного елемента над іншим. АНР забезпечує прозору та обґрунтовану основу для прийняття рішень у складних умовах багатофакторного вибору та забезпечує декомпозицію складної задачі, що є критичним для комп'ютерно-інтегрованих систем керування.

Відповідно до алгоритму методу, виділяємо:

- цільову функцію – у нашому випадку вона уже задана рівняннями (1)–(3);
- критерії: чотири ключові фактори, які входять до підінтегрального виразу функції (1): P_e, C_d , якість зневоднення $(W - W_i)^2$ та обмеження за солемістом $(S - S_{\max})^2$;
- альтернативи: у нашому випадку це змінні, які визначають режими роботи установки, тобто різні комбінації $T(t), E_f(t)$.

Експерти, зокрема фахівці з нафтопереробки та фахівці з автоматизації, які доступні авторам, провели парне порівняння критеріїв за шкалою Сааті (від 1 – критерії рівнозначні до 9 – один критерій абсолютно домінує над іншим). Значення елементів матриці порівнянь визначено на основі типових пріоритетів у нафтопереробці, де енергоефективність часто переважає через економічні чинники, і будуть такими:

- енерговитрати порівняно з вартістю реагентів: значення 4 – майже істотна перевага, оскільки енерговитрати становлять 60÷70% операційних витрат;
- енерговитрати порівняно з якістю зневоднення: значення 2 – дуже слабка перевага, оскільки низька якість може призвести до корозії обладнання;
- енерговитрати порівняно з обмеженнями за солемістом: значення 3 – слабка перевага, оскільки солеміст менш важливий у первинній обробці.

Подібне порівняння продовжується для всіх пар. На основі цих значень формуємо квадратну матрицю парних порівнянь $A = [a_{ij}]$, де a_{ij} – оцінка переваги критерію i над j за шкалою Сааті, і $a_{ij} = 1/a_{ji}$, $a_{ii} = 1$. Розмір матриці $n = 4$.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 4 & 2 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/3 & 2 \\ 1/2 & 3 & 1 & 5 \\ 1/3 & 1/2 & 1/5 & 1 \end{pmatrix}$$

Максимальне власне значення такої матриці $\lambda_{\max} \approx 4,17$. Індекс узгодженості проведених попарних порівнянь $C_i = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = 0,056$ незначно більше 0, що свідчить про високий ступінь узгодженості.

Нормалізований вектор вагових коефіцієнтів: $w_i = \frac{v_i}{\sum v_i}$, $\sum w_i = 1$, $i = 1 \dots n$. Проведені обчислення дає значення ваг $w = [0,49; 0,12; 0,29; 0,09]$.

Постановка та розв'язання задачі оптимізації. Після встановлення числових значень вагових коефіцієнтів отримаємо конкретний вигляд критерію оптимальності J :

$$J = \int_0^{t_f} [0,49P_e + 0,12C_d + 0,29(W - W_i)^2 + 0,09(S - S_{\max})^2] dt \rightarrow \min.$$

Об'єкт при цьому описується системою рівнянь (1) – (3) за обмежень: $70 \leq T(t) \leq 140$ °С, $4 \leq E_f \leq 6$ кВ/см. Таким чином, оптимізація процесу первинної переробки нафти потребує вирішення низки задач динамічної оптимізації. Вирішення виконувалося методом прямої колокації шляхом представлення задачі як набору взаємопов'язаних задач із нелінійною цільовою функцією з обмеженнями [13]. Розв'язання задачі нелінійного програмування, своєю чергою, проводиться генетичним алгоритмом [14], який було реалізовано за допомогою бібліотеки

DEAP мовою програмування Python [15]. Параметри генетичного алгоритму такі: популяція – 1 000 індивідів, 2 500 поколінь, імовірність кросовінгу – 0,75, імовірність мутації – 0,2. Рішення проводилося для значень напруженості електричного поля в електродегідраторі 4 і 6 кВ/см і зупинялося у разі досягнення цільового значення вмісту води у нафти – 0,1. Рішення подано на рис. 1 та 2.

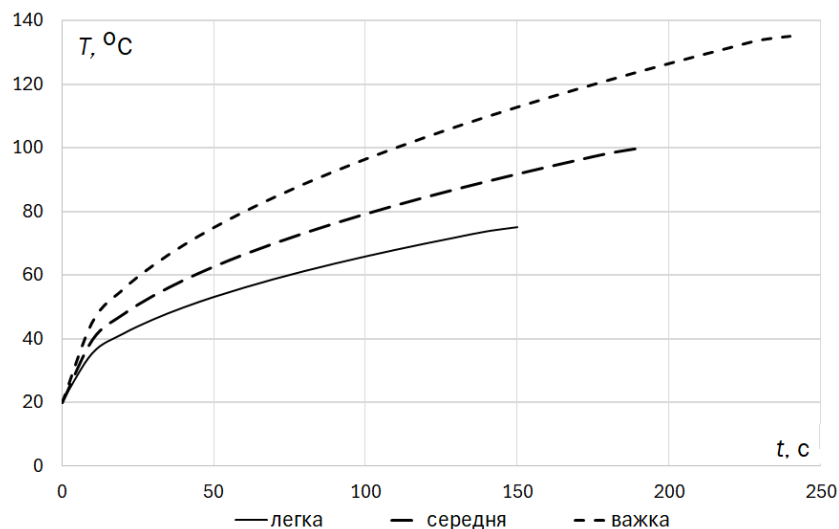


Рис. 1. Траєкторія зміни температури в електродегідраторі $E_f = 4$ кВ/см

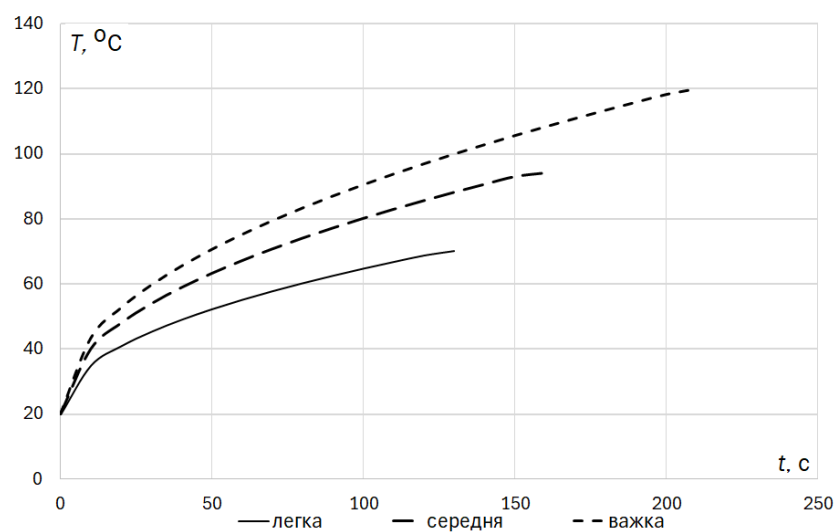


Рис. 2. Траєкторія зміни температури в електродегідраторі $E_f = 6$ кВ/см

Розрахунки показують, що реалізація такої траєкторії призводить до зменшення узагальненого показника J приблизно на 20% порівняно з базовим режимом. Це дає змогу знизити енергетичні витрати на 15% для легких нафт та майже на 25% для важких нафт. Більш детальний аналіз розв'язків показує, що найбільший вплив на швидкість зневоднення має температура, причому для важких нафт ця залежність виражена сильніше.

Висновки

Запропонована математична модель адекватно описує динаміку процесу первинної обробки нафти та дає змогу врахувати ключові технологічні чинники. Розроблений критерій

оптимальності забезпечує збалансоване врахування економічних та технологічних вимог. Перевірка, проведена за результатами імітаційного експерименту, підтвердила ефективність запропонованого підходу: за рахунок оптимізації температурних режимів удалося досягти зниження енерговитрат на 15÷20% за умови досягнення цільової концентрації води у нафті 0,1%.

Перспектива подальших досліджень пов'язана з інтеграцією запропонованої моделі в системи керування та розробленням адаптивних алгоритмів корекції параметрів моделі в реальному часі, включаючи машинне навчання для прогнозування збурень.

Список використаної літератури

1. Білецький В.С. Орловський В.М., Дмитренко В.І., Похилко А.М. Основи нафтогазової справи. Полтава : ПолтНТУ ; Київ : ФОП Халіков Р.Х, 2017. 312 с.
2. Склабінський В.І., Ляпощенко О.О., Артюхов А.Є. Технологічні основи нафто- та газопереробки. Суми : Сумський державний університет, 2011. 186 с.
3. Teixeira C., Oliveira A., Medeiros Júnior I., Wang Hantao L. Unified multi-parameter predictive modeling of crude oil and its distilled fractions through Artificial Neural Networks. *Fuel*. 2024. Vol. 358. 130156. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130156>
4. Rolando J.A.-A., Optimization of petroleum products distribution via pipeline systems: Modeling and computational challenges. *Heliyon*. 2024. Vol. 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33947>
5. Vessaire C., Chancelier J.-P., De Lara M. Carpentier P., Rodríguez-Martínez A., Robert A. Multistage optimization of a petroleum production system with material balance model. *Computers & Chemical Engineering*. 2022. Vol. 167. 108005. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108005>
6. Aryafard E., Farsi M., Rahimpour M.R. Modeling and simulation of crude oil desalting in an industrial plant considering mixing valve and electrostatic drum. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. 2015. Vol. 95. P. 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2015.06.011>
7. Aryafard E., Farsi M., Rahimpour M.R., Raeissi S. Modeling Modeling electrostatic separation for dehydration and desalination of crude oil in an industrial two-stage desalting plant. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. 2015. Vol. 58. P. 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.06.028>
8. Kareem Al-Musaedi F.A.R., Ghafouri Taleghani H., Esmaili Paeen Afrakoti I. Simulation and Multi-Objective Optimization of the Crude Oil Treatment Plant in Rumaila Oil Field. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*. 2023. Vol. 42(3). P. 962–976. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2022.545873.5083>
9. Ewees A., Al-Qaness M., Thanh H., Alrassas A., Elsayed A., Elaziz M. Optimized neural networks for efficient modeling of crude oil production. *Knowledge and Information Systems*. 2025. Vol. 67. P. 6171–6192. <https://10.1007/s10115-025-02415-4>
10. Maleki N., Bagherifard M., Gholamian M.R. Application of Incomplete Analytic Hierarchy Process and Choquet Integral to Select the best Supplier and Order Allocation in Petroleum Industry. *International Journal of Engineering*. 2020. Vol. 33(11). P. 2299–2309. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.11b.20>
11. Mohamed A. Fahim, Taher A. Alsahhaf, Amal Elkilani. *Fundamentals Of Petroleum Refining*. Oxford: Elsevier. 2010. 496 p.
12. Saaty T. How to make and jusoffy a decision: the analytic hierarchy process (AHP) part 1. Examples and applications. *System research & information technologies*. 2002. Vol. 1. P. 95–108.
13. Betts, John T. *Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming*. Philadelphia : SIAM. 2nd ed. 2010. 434 p.

14. Кононюк А.Ю. Нейроні мережі і генетичні алгоритми. Київ : Корнійчук, 2008. 446 с.
15. DEAP documentation. Distributed Evaluation Algorithms in Python. URL: <https://deap.readthedocs.io/en/master/> (дата звернення: 17.10.2025).

References

1. Biletskyi, V.S., Orlovskiy, V.M., Dmytrenko, V.I., & Pokhylko, A.M. (2017). *Osnovy naftohazovoi spravy* [Fundamentals of the oil and gas business]. Poltava : PoltNTU, Kyiv: FOP Khalikov R.Kh [in Ukrainian].
2. Sklabinskyi, V.I., Liaposhchenko, O.O., & Artiukhov, A.Ie. (2011). *Tekhnolohichni osnovy nafto- ta hazopererobky* [Technological fundamentals of oil and gas refining]. Sumy : Sumskiy derzhavnyi universytet [in Ukrainian].
3. Teixeira, C., Oliveira, A., Medeiros Júnior, I., & Wang Hantao, L. (2024). Unified multi-parameter predictive modeling of crude oil and its distilled fractions through Artificial Neural Networks. *Fuel*, 358, 130156. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130156> [in English].
4. Rolando, J.A.-A., (2024). Optimization of petroleum products distribution via pipeline systems: Modeling and computational challenges. *Heliyon*, 10(14). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e33947> [in English].
5. Vessaire, C., Chancelier, J.-P., De Lara, M., Carpentier, P., Rodríguez-Martínez, A., & Robert, A. (2022). Multistage optimization of a petroleum production system with material balance model. *Computers & Chemical Engineering*, 167, 108005. doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.108005 [in English].
6. Aryafard, E., Farsi, M., & Rahimpour, M.R. (2015). Modeling and simulation of crude oil desalting in an industrial plant considering mixing valve and electrostatic drum. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 95, 383–389. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2015.06.011> [in English].
7. Aryafard, E., Farsi, M., Rahimpour, M.R., & Raeissi, S. (2015). Modeling Modeling electrostatic separation for dehydration and desalination of crude oil in an industrial two-stage desalting plant. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 58, 423–430. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2015.06.028> [in English].
8. Kareem Al-Musaedi, F.A.R., Ghafouri Taleghani, H., & Esmaili Paeen Afrakoti, I. (2023). Simulation and Multi-Objective Optimization of the Crude Oil Treatment Plant in Rumaila Oil Field. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, 42(3), 962–976. <https://doi.org/10.30492/ijcce.2022.545873.5083> [in English].
9. Ewees, A., Al-Qaness, M., Thanh, H., Alrassas, A., Elsayed, A., & Elaziz, M. (2025). Optimized neural networks for efficient modeling of crude oil production. *Knowledge and Information Systems*, 67, 6171–6192. <https://doi.org/10.1007/s10115-025-02415-4> [in English].
10. Maleki, N., Bagherifard, M., & Gholamian, M.R. (2020). Application of Incomplete Analytic Hierarchy Process and Choquet Integral to Select the best Supplier and Order Allocation in Petroleum Industry. *International Journal of Engineering*, 33(11), 2299-2309. <https://doi.org/10.5829/ije.2020.33.11b.20> [in English].
11. Mohamed, A. Fahim, Taher, A. Alsahhaf, & Amal Elkilani. (2010). *Fundamentals Of Petroleum Refining*. Oxford: Elsevier [in English].
12. Saaty, T. (2002). How to make and justify a decision: the analytic hierarchy process (AHP) part 1. Examples and applications. *System research & information technologies*, 1, 95–108 [in English].
13. Betts, John T. (2010). *Practical methods for optimal control and estimation using nonlinear programming*. Philadelphia: SIAM. 2nd ed [in English].
14. Kononiuk, A.Yu. (2008). *Neironi merezhi i henetychni alhorytmy* [Neural networks and genetic algorithms]. Kyiv: «Korniichuk» [in Ukrainian].
15. DEAP documentation. Distributed Evaluation Algorithms in Python. Retrieved from: <https://deap.readthedocs.io/en/master/> (date of application 10/17/2025) [in English].

Цапар Віталій Степанович – к.т.н., доцент, завідувач кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: cwst@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8347-7941.

Складаний Денис Миколайович – к.т.н., доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: skl_den@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3624-5336.

Квітка Олександр Олександрович – к.х.н., доцент, доцент кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: alkvi@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4034-7052.

Ткачук Сергій Михайлович – аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: tpza@kpi.ua, ORCID: 0009-0002-4013-8875.

Бондар Вадим Валерійович – аспірант кафедри технічних та програмних засобів автоматизації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського». E-mail: tpza@kpi.ua, ORCID: 0009-0000-3320-4550.

Tsapar Vitalii Stepanovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Automation Hardware and Software Department of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». E-mail: cwst@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8347-7941.

Skladanny Denys Mykolaiovych – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Automation Hardware and Software Department of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. E-mail: skl_den@ukr.net, ORCID: 0000-0003-3624-5336.

Kvitka Oleksandr Oleksandrovyh – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Automation Hardware and Software Department of the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». E-mail: alkvi@ukr.net, ORCID: 0000-0003-4034-7052.

Tkachuk Serhii Mykhailovych – post-graduate student of the Automation Hardware and Software Department, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». E-mail: tpza@kpi.ua, ORCID: 0009-0002-4013-8875.

Bondar Vadym Valeriiovych – Postgraduate Student at the Automation Hardware and Software Department at the National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute». E-mail: tpza@kpi.ua, ORCID: 0009-0000-3320-4550.

Дата надходження статті: 03.11.2025

Дата прийняття статті: 09.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

