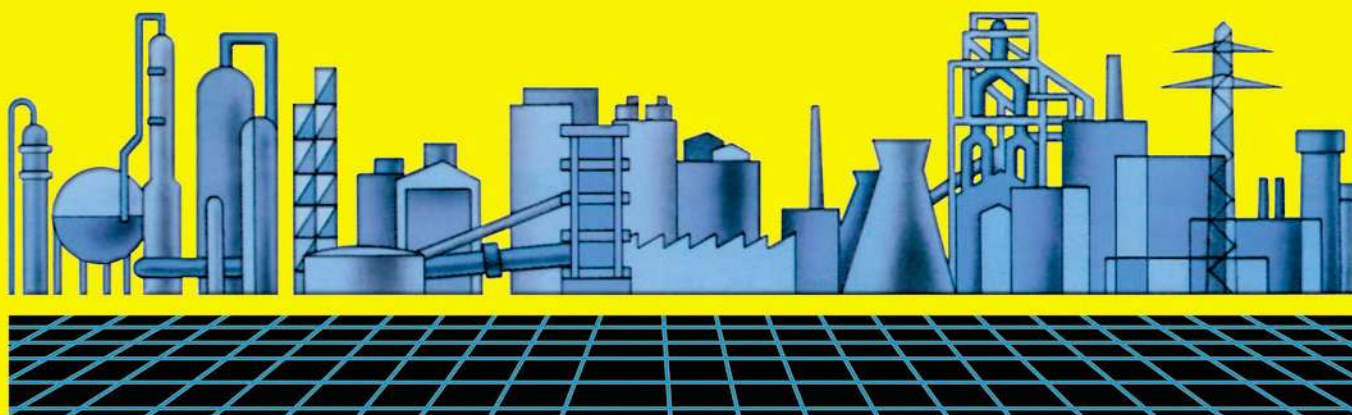


ІТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

2'2025

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(від листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідчення Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.
Свідчення перереєстровано у Міністерстві юстиції України
КВ № 24313-ПР від 06.02.2020 р.
Ідентифікатор медіа R30-02564, згідно з рішенням Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення від 11.01.2024 №33

Журнал включений
до переліку наукових фахових видань України
(Наказ Міністерства освіти та науки України №886 від 02.07.2020)
Категорія журналу «Б»

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. Товажнянський, член-кор. НАН України
Технічний редактор
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц., зав. каф. ІТПА НТУ "ХПІ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньєва, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ ХНУМІ ім. О.М. Бекетова
В. Є. Вель, д-р техн. наук, професор, професор каф. ІТПА НТУ "ХПІ"
П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, проф. каф. ТЖПБ НТУ "ХПІ"
П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав. каф. АУТС НТУ "ХПІ"
М. П. Кудненко, д-р техн. наук, професор, зав. каф. Теплотехніки та енергоефективних технологій НТУ "ХПІ"
В. В. Стариков, д-р техн. наук, доцент, зав. каф. Технічної кріофізики НТУ "ХПІ"
Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПІ"
А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, професор каф. ТЕТ НТУ "ХПІ"
О. Б. Аніпко, д-р техн. наук, професор каф. інженерно-авіаційного забезпечення, Харківський національний університет Повітряних сил ім. І.Кожедуба
В. А. Маляренко, д-р техн. наук, професор, професор каф. СЕЕМ ХНУМІ
В. В. Лебедєв, д-р техн. наук, доцент, доцент каф. ТПМ і БАП НТУ "ХПІ"
П. О. Капустенко, канд. техн. наук, професор, акад. Академії будівництва України
Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Католицький університет, Будапешт, Угорщина
Шарифа Рафіда Ван Алви, PhD, professor, Малайзійський університет технологій
Девид Дж. Куккулька, PhD, професор, Державний університет Нью-Йоркського коледжу у Буффало, США
Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, Падерборнський університет, Німеччина
Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато, Мексика
Петар Варбанов, старший науковий співробітник NETME Center - SPIL, Технологічний університет Брно, Чеська республіка
Майкл Уолмслі, BE, PhD ChemEng, Університет Вайкато, Окленд, Нова Зеландія
П. Стехлік, PhD, проф., Директор Технологічного університету Брно (Чеська республіка)
Панос Сеферліс, PhD., проф., університет Арістотеля в Салоніках, Греція

Журнал включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі до бібліографічної бази даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://ite.khpi.edu.ua>

EDITORIAL BOARD

The editor-in-chief

L. L. Tovazhnyanskyi, Corresponding Member of the NAS of Ukraine, Doctor of Technical Sciences, Professor, NTU "KhPI"

Technical editor

K. O. Gorbunov, PhD, Assistant Professor, professor NTU "KhPI"

THE MEMBERS OF THE EDITORIAL BOARD:

O. P. Arsenyeva, Doctor of Technical Sciences, Prof., O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv
V. E. Ved, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
P. O. Nekrasov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
P. O. Kachanov, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
M. P. Kundenko, Doctor of Technical sciences, Prof., Head of Heat engineering and energy efficient technologies department NTU "KhPI"
V. V. Starikov, Doctor of Technical sciences, Assistant Professor, Head of Technical Cryophysics Department NTU "KhPI"
G. L. Khavin, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
A. M. Hanzha, Doctor of Technical Sciences, Prof., NTU "KhPI"
O. B. Anipko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kozhedub Kharkiv Air Force University
V. A. Malyarenko, Doctor of Technical Sciences, Prof., Kharkov National University of Municipal Economy named after O.M. Beketova
V. V. Lebediev, Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, NTU "KhPI"
P. O. Kapustenko, PhD, professor NTU "KhPI"
Ferenc Friedler, PhD, professor, Pázmány Péter Catholic University, Budapest, Hungary
Sharifah Rafidah Wan Alwi, PhD, professor, Universiti Teknologi Malaysia
David J. Kukulka, PhD., professor, State University of New York College at Buffalo, USA
Eugeniy Kenig, prof., dr.-ing., Paderborn University, Germany
Martin Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato, Mexico
Petar Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre - SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic
Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New Zealand
Petr Stehlik, PhD., professor, Director of Institute Brno University of Technology, Czech Republic
Panos Seferlis, PhD., professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЙ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Книш М. І., Суржко Т. О.

Дослідження обладнання блоку очистки промивальної рідини з аналізом енергоефективності піногенераторів в умовах змінного тиску і витрати рідини..... 3

Рябова І. Б., Горбунов К. О., Миронов А. М., Ільченко М. В., Гарєв Л. А.

Дослідження можливостей підвищення енергоефективності парокompресійних холодильних машин у промисловості..... 14

Стасов В. А., Миронов А. М., Ільченко М. В., Селіхов Ю. А., Горбунов К. О.,

Биканов С. М., Краснокутський Є. В.

Комплексний огляд методів теплової інтеграції вторинних енергоресурсів у технологічні процеси для оптимізації природоємності промислової продукції..... 25

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Миронов А. М., Ільченко М. В., Перемот К. В.

Розрахунок надійності застосування сонячних колекторів..... 38

Миронов А. М., Ільченко М. В., Гапонова О. О., Пономаренко Є. Д.,

Горбунов К. О., Биканов С. М.

Математичне та імітаційне моделювання хімічного реактора ідеального змішування для оптимізації об'єму робочого середовища..... 53

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Фик І. М., Кривуля С. В.

Щодо економічного ефекту від відновлення запасів газу на прикладі Шебелинського газоконденсатного родовища..... 65

Шкоп А. О., Шестопалов О. В., Пономарьова Н. Г., Босюк А. С., Нечипоренко Д. І.,

Войтенко Д. М.

Аналіз результатів очищення та зневоднення шламів мокрої газоочистки викидів металургійного підприємства..... 76

Невлюдов І. Ш., Овчаренко В. Є., Токарєва О. В., Гурін І. В.

Автоматизація регулювання технологічних параметрів виготовлення ВВКМ на основі контролю діелектричних характеристик..... 89

Зезекало І. Г., Подоляк М. М.

Автоклавні дослідження каталітичної конверсії вуглеводневої сировини 102

Леонтьєва Н. В., Фик М. І.

Комплексна оцінка технологіко-економічних переваг перепрофілювання нафтогазових свердловин для геотермальних проєктів ДДЗ 115

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Байрачний В. Б., Адашевський О. В., Сакун А. О., Литвин А. О., Бутко В. С.

Дослідження запиленості повітря тваринницьких комплексів..... 131

Putyatin B. V., Blyznyuk O. M., Belinska A. P., Stankevych S. V., Kariyk A. O., Kibenko N. Yu.

Technological and biomaterial science approaches to quality assessment of essential oils in the cosmeceutical industry..... 140

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 6 від 28.05.2025 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : щоквартальний науково-практичний журнал / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – № 2. – 148 с.

Журнал наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій різноманітних галузей промисловості.

© Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», 2025

М. І. Книш, аспірант, Т. О. Суржко, аспірантка

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ БЛОКУ ОЧИСТКИ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ З АНАЛІЗОМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІНОГЕНЕРАТОРІВ В УМОВАХ ЗМІННОГО ТИСКУ І ВИТРАТИ РІДИНИ

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Ключові слова: блок очистки, конструкція, піногенератор, струмень, енергоефективність, тиск, піна.

Вступ. У сучасних технологічних процесах все більшого значення набуває енергоефективність обладнання, що використовується для очищення рідин, зокрема у промислових і виробничих системах. З огляду на постійне зростання вартості енергоресурсів та підвищення екологічних вимог, актуальним є пошук технічних рішень, які дозволяють мінімізувати енергоспоживання без втрати ефективності роботи [1, 3, 11]. Особливо це стосується обладнання, що функціонує за допомогою змінного тиску та витрати, де оптимізація робочих режимів безпосередньо впливає на загальну продуктивність та економічність процесу [2, 5].

Піногенератори, які є складовою частиною блоку очистки промивальної рідини, використовуються для створення піни, що сприяє інтенсифікації процесів очищення [4, 6]. Енергоефективність роботи цих пристроїв визначається здатністю утворювати піну з мінімальними втратами енергії при заданих параметрах тиску та витрати на вході й виході [7, 10]. Одним із ключових завдань сучасної інженерної практики є дослідження впливу змін робочих умов – зокрема тиску та витрати рідини – на ефективність функціонування піногенераторів [8, 9].

У даній роботі проведено чисельне моделювання процесів, що відбуваються в піногенераторах, за допомогою програмного комплексу FlowSimulation (SolidWorks) [13]. На основі отриманих результатів було визначено коефіцієнти енергоефективності при різних режимах роботи, що дозволило ідентифікувати найбільш раціональні параметри експлуатації. Зокрема, досліджено діапазони тиску від 6 до 12 МПа та витрати рідини від 0,001 до 0,025 м³/с. Встановлено, що найвищу ефективність піногенератор демонструє при витраті 0,015 м³/с та тиску 8 МПа, що є оптимальним з погляду співвідношення енергоспоживання до продуктивності [14].

Ці дані мають практичну цінність для розробки нових енергозберігаючих рішень та модернізації існуючих установок очищення, сприяючи підвищенню загальної ефективності виробничих процесів [1, 11, 12, 14].

Обговорення результатів. За допомогою чисельного моделювання в середовищі FlowSimulation (SolidWorks) проведемо аналіз функціонування піногенераторів за різних експлуатаційних режимів. Отримані результати дозволять визначити оптимальні значення витрати рідини та тиску, за яких забезпечується максимальна енергоефективність, що має важливе практичне значення для вдосконалення існуючих систем очищення. Для розрахунку коефіцієнта енергоефективності застосовуємо наступну формулу:

$$C = \frac{p_1 Q_1 + p_2 Q_2}{p_3 Q_3},$$

де p_1, Q_1 – відповідно тиск і витрата рідинного струменя на вході в піногенератор;
 p_2, Q_2 – відповідно тиск і витрата повітряного струменя на вході в піногенератор;
 p_3, Q_3 – відповідно тиск і витрата пінного струменя на виході з піногенератора.

Для розрахунків використано отримані результати за допомогою програми FlowSimulation, що є прикладним модулем SolidWorks.

Проведено дослідження витрати рідини від 0,001 до 0,025 м³/с при різних тисках піни на виході піногенератора.

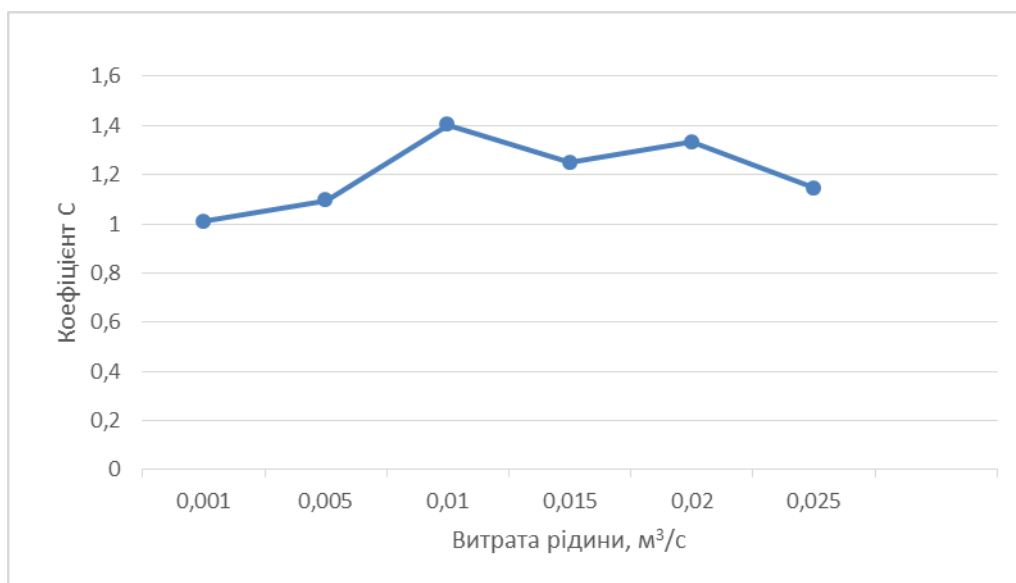


Рисунок 1 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 6 МПа

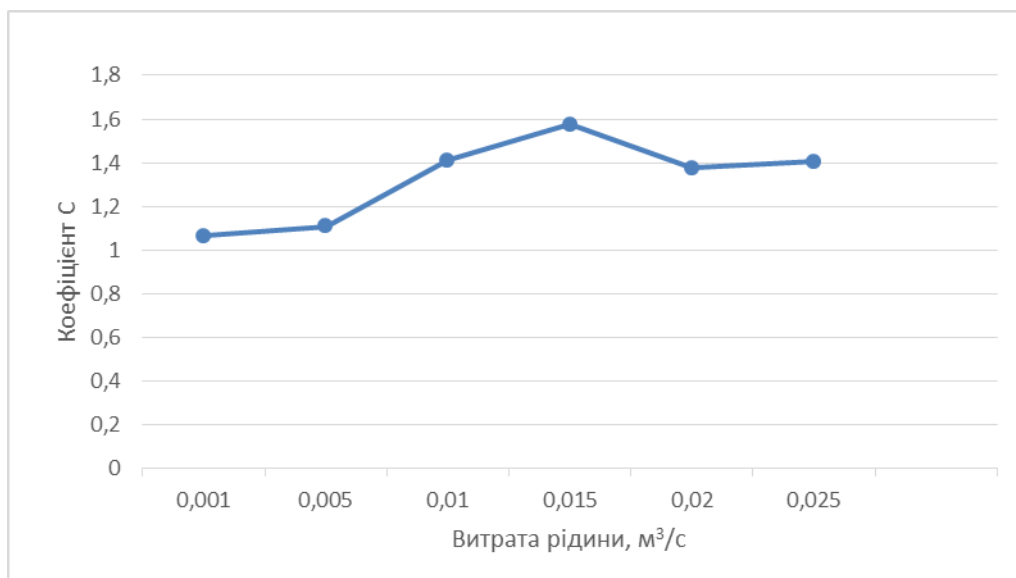


Рисунок 2 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 7 МПа

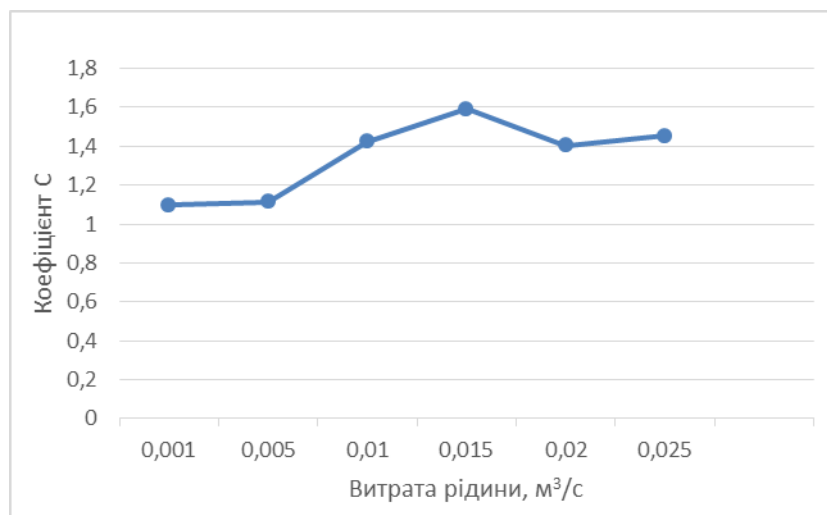


Рисунок 3 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 8 МПа

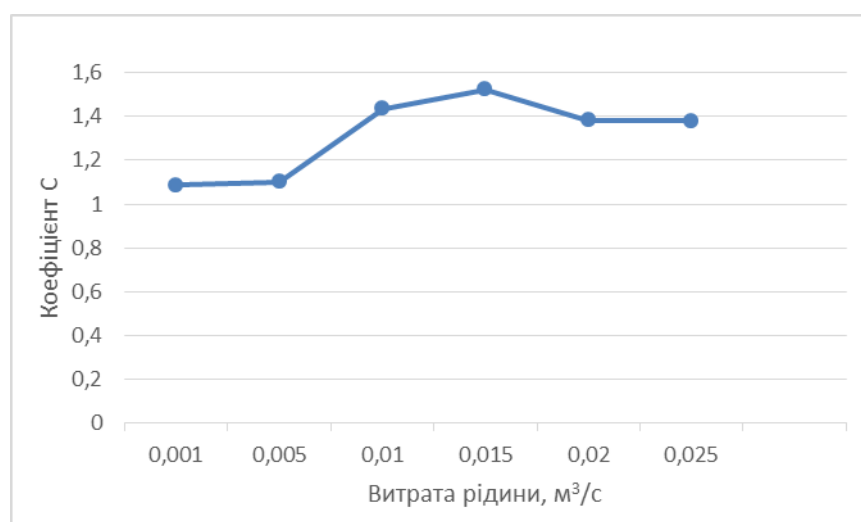


Рисунок 4 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 9 МПа

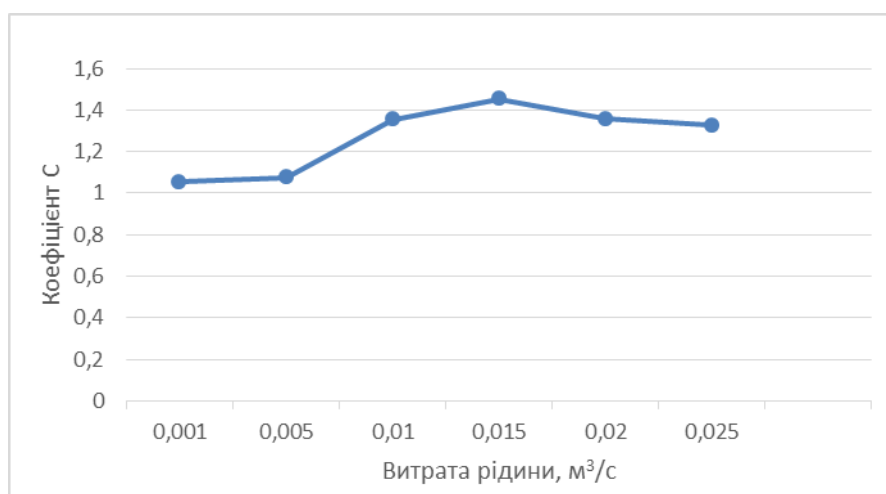


Рисунок 5 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 10 МПа

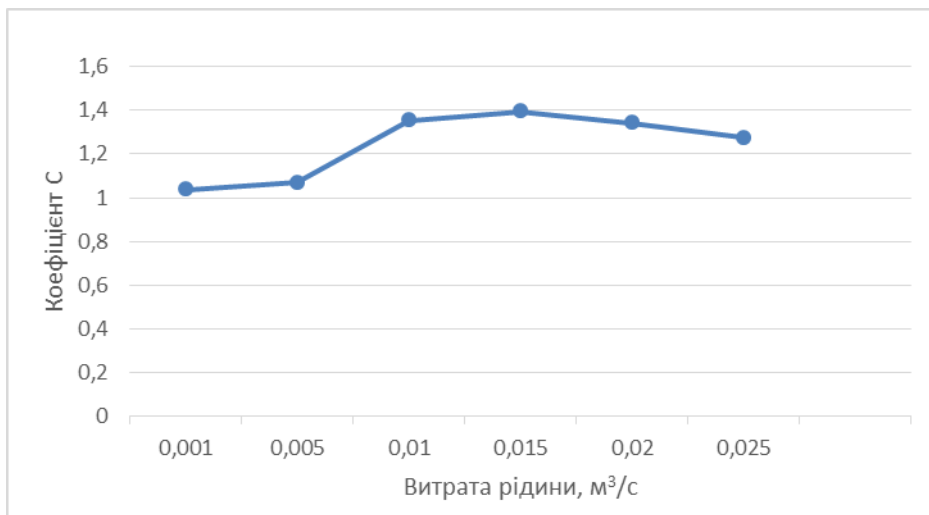


Рисунок 6 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 11 МПа

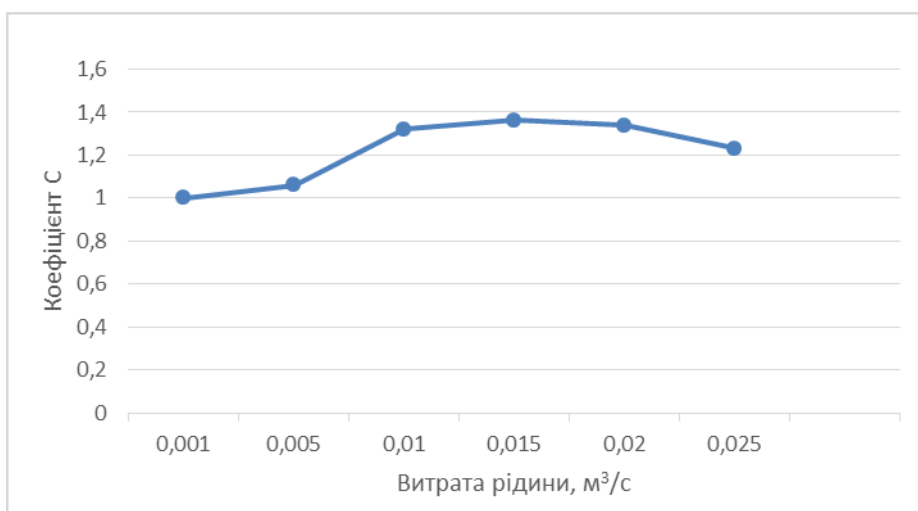


Рисунок 7 – Значення коефіцієнта енергоефективності при тиску піни на виході 12 МПа

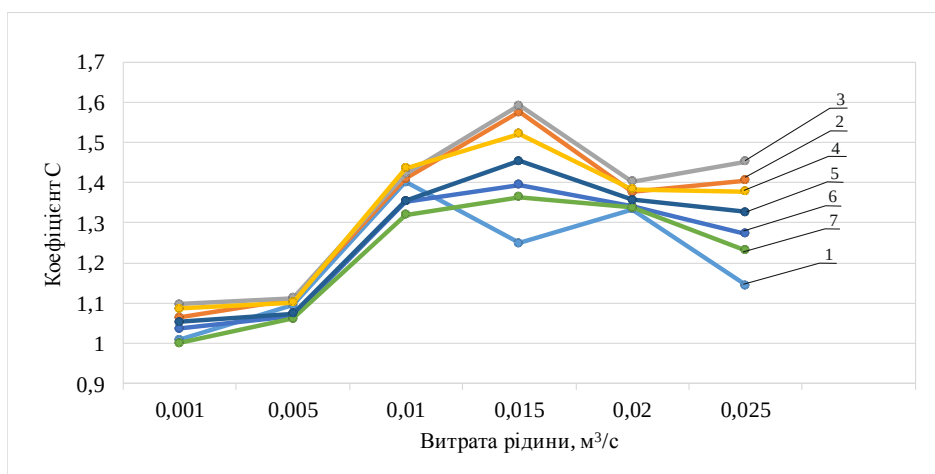


Рисунок 8 – Значення коефіцієнта енергоефективності при різних тисках піни на виході:
1 – 6 МПа; 2 – 7 МПа; 3 – 8 МПа; 4 – 9 МПа; 5 – 10 МПа; 6 – 11 МПа; 7 – 12 МПа

Проведені дослідження (рис. 1–8) підтверджують енергоефективність піногенератора.

Тиск піни на виході змінювався в робочих режимах піногенератора від 6 до 12 МПа. Витрата рідини змінювалась залежно від зміни робочої насадки в соплах піногенератора.

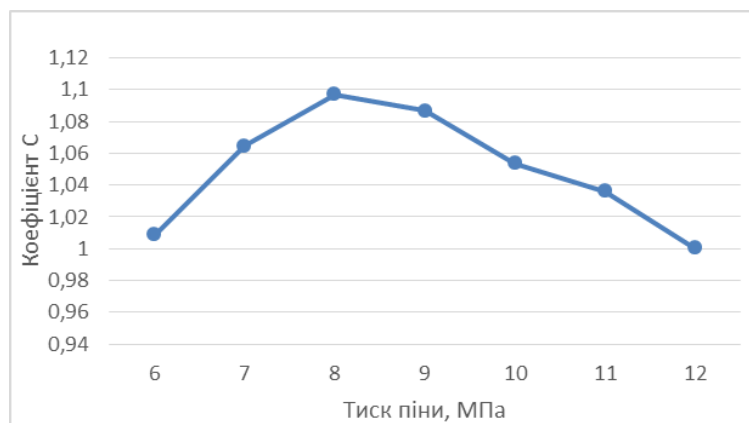


Рисунок 9 – Значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини 0,001 м³/с

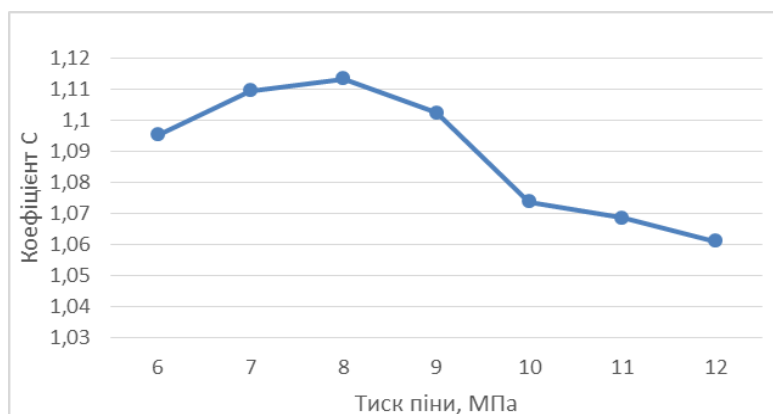


Рисунок 10 – Значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини 0,005 м³/с

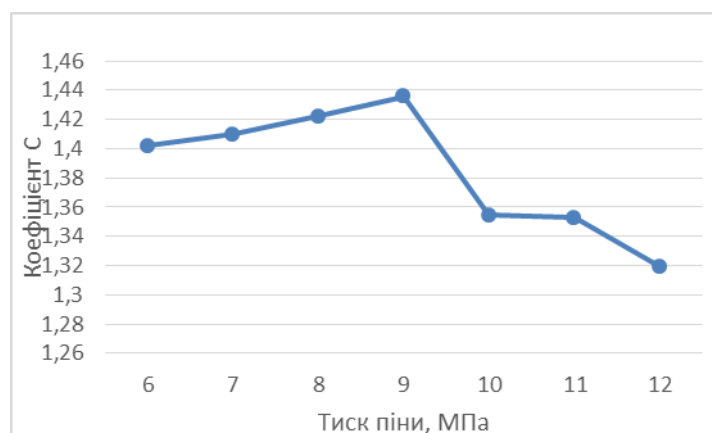


Рисунок 11 – Значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини 0,01 м³/с

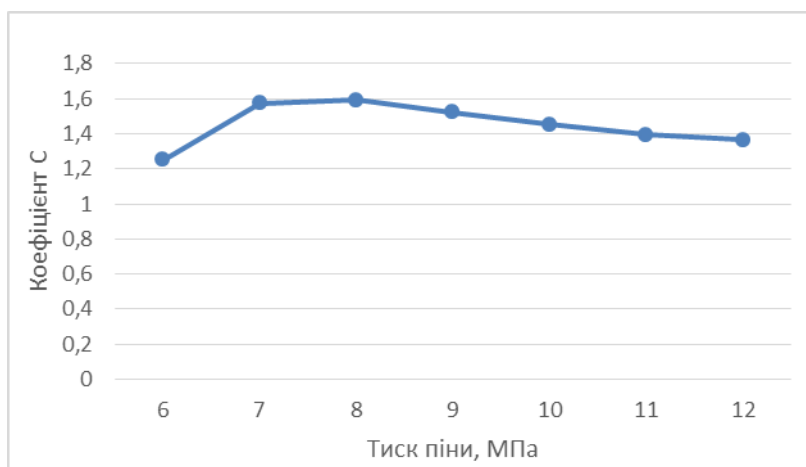


Рисунок 12 – Значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини 0,015 м³/с

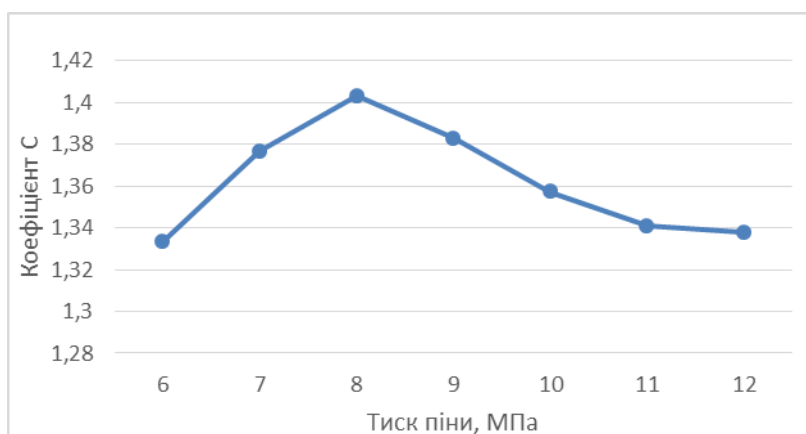


Рисунок 13 – Значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини 0,02 м³/с

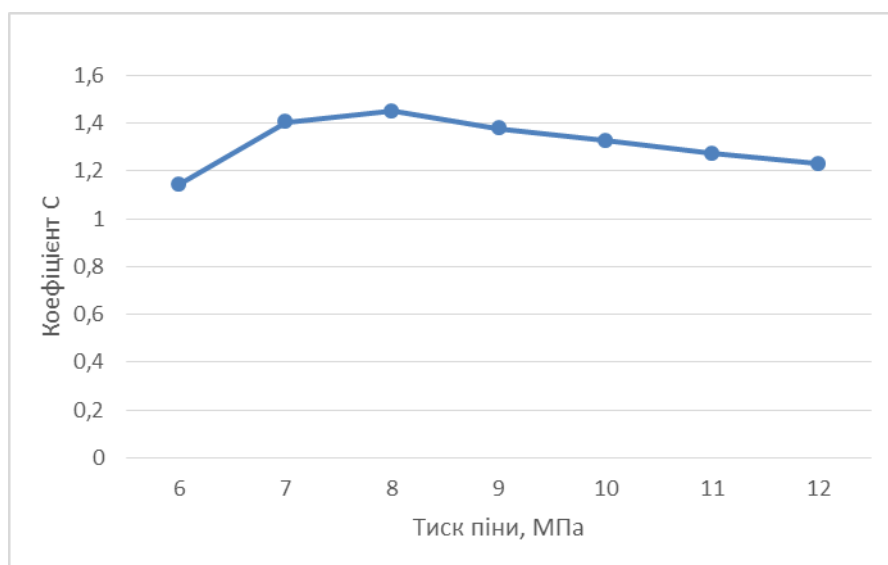


Рисунок 14 – Значення коефіцієнта енергоефективності при витраті рідини 0,025 м³/с

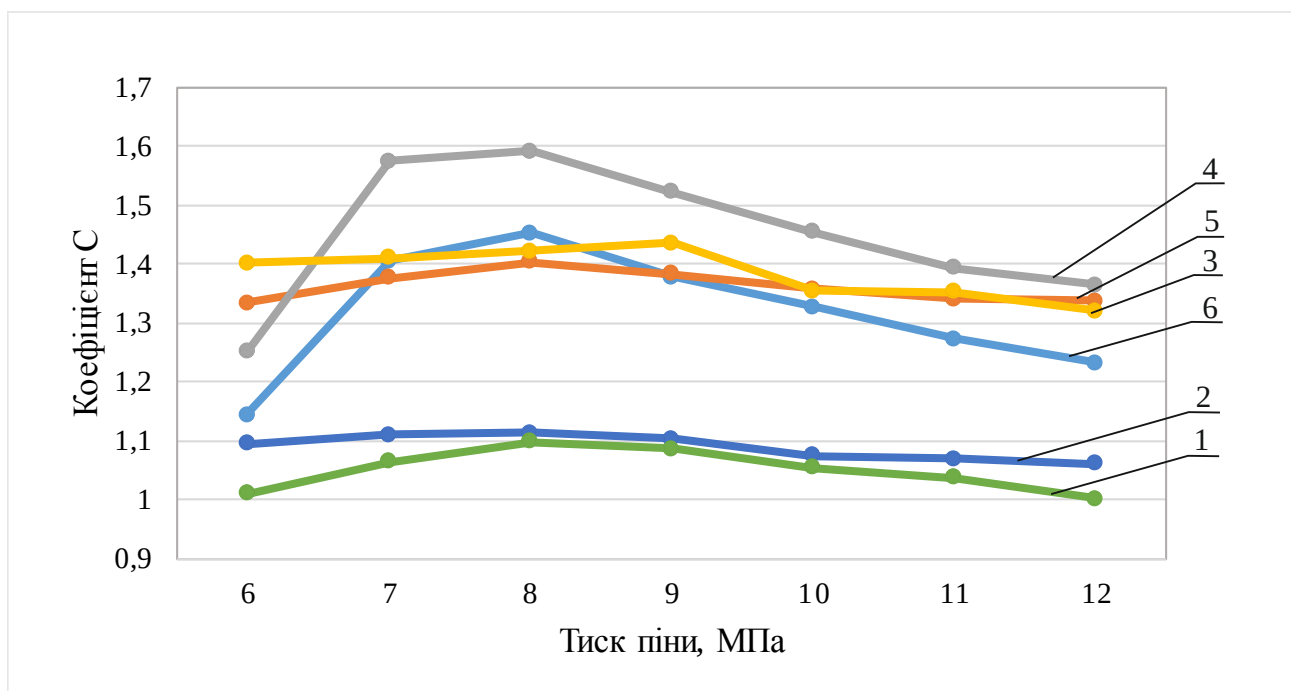


Рисунок 15 – Значення коефіцієнта енергоефективності при різних витратах рідини: 1 – 0,001 м³/с; 2 – 0,005 м³/с; 3 – 0,01 м³/с; 4 – 0,015 м³/с; 5 – 0,02 м³/с; 6 – 0,025 м³/с

Отримані результати (рис. 9–15) підтверджують енергоефективність піногенератора.

Найменший коефіцієнт енергоефективності спостерігається при витраті рідини 0,001 м³/с і коливається в межах від 1 до 1,09. При збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зростає і при витраті рідини 0,015 м³/с коливається в межах від 1,25 до 1,59 (при тиску піни 8 МПа). Згідно проведених досліджень це найефективніший режим роботи піногенератора. При подальшому збільшенні витрати рідини коефіцієнт енергоефективності зменшується і при витраті рідини 0,025 м³/с коливається в межах від 1,14 до 1,45.

Висновки. За результатами проведеного дослідження встановлено, що енергоефективність піногенераторів, які входять до складу обладнання блоку очистки промивальної рідини, суттєво залежить від гідродинамічних параметрів їх функціонування, зокрема витрати рідини та робочого тиску. Встановлено, що оптимальний режим експлуатації досягається при витраті рідини 0,015 м³/с та тиску 8 МПа, за якого фіксується найвищий коефіцієнт енергоефективності в межах 1,25–1,59, що свідчить про раціональне співвідношення між енергоспоживанням та продуктивністю пристрою. Відхилення параметрів від оптимального діапазону, як у бік зменшення, так і збільшення витрати, супроводжується зниженням енергоефективності, що зумовлює необхідність точного регулювання експлуатаційних режимів. Отримані результати мають прикладне значення для удосконалення методів розрахунку й проектування технологічного обладнання, оптимізації енергоспоживання в системах очищення рідин, а також для забезпечення високої екологічної та економічної ефективності виробничих процесів. Запропонований підхід до чисельного моделювання із використанням програмного середовища FlowSimulation (SolidWorks) демонструє високу ефективність для аналізу й оптимізації

параметрів гідродинамічного середовища і може бути адаптований до дослідження інших типів обладнання, що функціонують в умовах змінних режимів, що, у свою чергу, відкриває перспективи для створення комплексних енергоощадних технологій у різних галузях промисловості.

Література

1. Liakh M. M., Savyk V. M., Molchanov P. O. Experimental and industrial research on foamgenerating devices. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. No. 5 (161). P. 17–23. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1493-2017-ukr/zmist-5-2017/rozrobka-rodovishch-korisnikh-kopalin/4151-eksperimentalni-ta-promislovi-doslidzhennya-pinogeneruyuchikh-pristrojiv>
2. Чудик І. І. Енергетичні витрати в процесі буріння свердловини. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 2 (3). С. 5–8.
3. Чудик І. І., Бабій Р. Б. Оптимальна подача промивальної рідини на вибій при бурінні свердловини. *Нафтогазова енергетика*. 2007. № 3 (4). С. 71–75.
4. Семеняка О. Г., Кушнарьов С. І., Росляков В. О. та ін. Освоєння свердловин піною із застосуванням пристрою, розробленого УкрНДІгазом. *Питання розвитку газової промисловості України* : зб. наук. праць. Харків : УкрНДІгаз, 2017. Вип. XLV. С. 112–116.
5. Лях М. М., Тимошенко В. М., Савик В. М., Яцишин Т. М. Підвищення ефективності піногенеруючих пристроїв для первинного розкриття продуктивних горизонтів з аномально-низькими пластовими тисками. *Нафтогазова енергетика: проблеми та перспективи* : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф., Івано-Франківськ, 20–23 жовтня 2009 р. С. 73.
6. Кондрат Р. М., Кондрат О. Р., Марчук Ю. В., Хомин І. І. Підвищення продуктивності низькодебітних обводнених газових і газоконденсатних свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2007. № 3 (24). С. 14–17.
7. Пащенко О. А. Шляхи підвищення надійності та ефективності бурового обладнання. *Форум гірників – 2016* : матеріали міжнар. конф., м. Дніпропетровськ. С. 5–6.
8. Liakh M. M., Savyk V. M., Molchanov P. O. Improving the efficiency of foamgenerating devices of pump-circulative systems of drilling sets. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2016. No. 3. P. 16–23. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1247-2016/zmist-3-2016/rozrobka-rodovishch-korisnikh-kopalin/3517-pidvishchennya-efektivnosti-pinogeneruyuchikh-pristrojiv-nasosno-tsirkulyatsijnikh-sistem-burovikh-ustanovok>.
9. Олійник С. М., Черненко Д. П. Чисельне моделювання процесів піногенерації. *Комп'ютерне моделювання в інженерії*. 2019. 3 (4). С. 65–71.
10. Чудик І. І. Дослідження величини подачі насоса для промивання скерованих свердловин. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2010. № 4 (37). С. 39–46.
11. Biletskyi V., Molchanov P., Sokur M., et al. Research into the process of preparation of Ukrainian coal by the oil aggregation method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3, no. 5 (87). P. 45–53. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.104123>
12. Hudz S., Ichanska N., Rendyuk S., Molchanov P. Optimization of the double-span purlins design sketch in a framework with portal frames through the rafter stays application.

Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. 2021. 1 (56), 30–36. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11337>.

13. Surzhko T., Savyk V., Molchanov P., Kaliuzhnyi A. The efficiency increase of equipment work for the cleaning block of washing fluid. *Збірник наукових праць [Національного університету Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка] : Галузеве машинобудування, будівництво.* Полтава : НУПП, 2020. Вип. 2 (55). С. 121–127. https://znp.nupp.edu.ua/uk/2_55_2020.

14. Kaliuzhnyi A., Molchanov P., Savyk V. et al. Determining foaming regularities enabled by a five-nozzle foam generator for drilling technologies under conditions of abnormally low pressures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* 2022. Vol. 4, no. 1 (118). P. 72–79. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262506>.

Bibliography (transliterated)

1. Liakh M. M., Savyk V. M., Molchanov P. O. (2017). Experimental and industrial research on foamgenerating devices. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5(161), 17–23. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1493-2017-ukr/zmist-5-2017/rozrobka-rodovishch-korisnikh-kopalin/4151-eksperimentalni-ta-promislovi-doslidzhennya-pinogeneruyuchikh-pristrojiv>

2. Chudyk I. I. (2007). Enerhetychni vytraty v protsesi burinnia sverdlovyny. *Naftohazova enerhetyka*, 2(3), 5–8.

3. Chudyk I. I., Babiy R. B. (2007). Optymalna podacha promyvalnoi ridyny na vybii pry burinni sverdlovyny. *Naftohazova enerhetyka*, 3(4), 71–75.

4. Semenyaka O. G., Kushnaryov S. I., Roslyakov V. O., Shlikhutka A. M., Mykhailikova N. B. (2017). Osvoiennia sverdlovyn pinoiu iz zastosuvanniam prystroiu, rozroblenoho UkrNDIhazom. *Pytannia rozvytku hazovoi promyslovosti Ukrainy : zb. nauk. prats* (Issue XLV, pp. 112–116.). Kharkiv: UkrNDIgaz.

5. Lyakh M. M., Tymoshenko V. M., Savyk V. M., Yatsyshyn T. M. (2009). Pidvyshchennia efektyvnosti pinoheneruiuchykh prystroiv dlia pervynnoho rozkryttia produktyvnykh horyzontiv z anomalno-nyzkymy plastovymy tyskamy. *Naftohazova enerhetyka: problemy ta perspektyvy : materialy Mizhnar. nauk.-tekh. konf., Ivano-Frankivsk, 20–23 zhovtnia 2009* (p. 73).

6. Kondrat R. M., Kondrat O. R., Marchuk Yu. V., Khomin I. I. (2007). Pidvyshchennia produktyvnosti nyzkodebitnykh obvodnennykh hazovykh i hazokondensatnykh sverdlovyn. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovishch*, 3(24), 14–17.

7. Pashchenko, O. A. (2016). Shliakhy pidvyshchennia nadiinosti ta efektyvnosti burovoho obladdnannia. *Forum hirnykiv – 2016: materialy mizhnar. konf., Dnipropetrovsk* (pp. 5–6).

8. Liakh M. M., Savyk V. M., Molchanov P. O. (2016). Improving the efficiency of foamgenerating devices of pump-circulative systems of drilling sets. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 16–23. URL: <https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1247-2016/zmist-3-2016/rozrobka-rodovishch-korisnikh-kopalin/3517-pidvyshchennya-efektyvnosti-pinogeneruyuchikh-prystroiv-nasosno-tsyrkuliatsiinykh-system-burovykh-ustanovok>

9. Oliinyk S. M., Chernenko D. P. (2019). Chyselne modeliuвання protsesiv pinoheneratsii. *Komp'uterne modeliuвання v inzhenerii*, 3(4), 65–71.

10. Chudyk I. I (2010). Doslidzhennia velychyny podachi nasosa dlia promyvannia skerovanykh sverdlovin. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovysch*, 4 (37), 39–46.

11. Liakh M. M., Savyk V. M., Molchanov P. O. (2016). Improving the efficiency of foamgenerating devices of pump-circulative systems of drilling sets. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 16–23. URL: [http://nvngu.in.ua/index.php/ru/\(https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1247-2016/zmist-3-2016/rozrobka-rodovysch-korisnikh-kopalin/3517-pidvishchennya-efektivnosti-pinogeneruyuchikh-pristrojiv-nasosno-tsirkulyatsijnikh-sistem-burovikh-ustanovok\)](http://nvngu.in.ua/index.php/ru/(https://nvngu.in.ua/index.php/uk/arkhiv-zhurnalu/za-vipuskami/1247-2016/zmist-3-2016/rozrobka-rodovysch-korisnikh-kopalin/3517-pidvishchennya-efektivnosti-pinogeneruyuchikh-pristrojiv-nasosno-tsirkulyatsijnikh-sistem-burovikh-ustanovok)).

12. Hudz S., Ichanska N., Rendyuk S., Molchanov P. (2021). Optimization of the double-span purlins design sketch in a framework with portal frames through the rafter stays application. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*, 1(56), 30–36. <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/11337>.

13. Surzhko, T. O., Savyk, V. M., Molchanov, P. O., Kalyuzhnyi, A. P. (2020). *The efficiency increase of equipment work for the cleaning block of washing fluid*. Zbirnyk naukovykh prats [Natsionalnoho universytetu Poltavskia politekhnika imeni Yuriia Kondratiuka]: Haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo. (Iss. 2(55), pp. 121–127). Poltava: NUPP, 2020. Retrieved from https://znp.nupp.edu.ua/uk/2_55_2020.

14. Kaliuzhnyi A., Molchanov P., Savyk V., Knysh M., Yaremiychuk R. (2022). Determining foaming regularities enabled by a five-nozzle foam generator for drilling technologies under conditions of abnormally low pressures. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4, 1 (118), 72–79. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.262506>.

УДК 622.276.3

М. І. Книш, Т. О. Суржко

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАДНАННЯ БЛОКУ ОЧИСТКИ ПРОМИВАЛЬНОЇ РІДИНИ З АНАЛІЗОМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПІНОГЕНЕРАТОРІВ В УМОВАХ ЗМІННОГО ТИСКУ І ВИТРАТИ РІДИНИ

У статті розглянуто питання підвищення енергоефективності обладнання блоку очистки промивальної рідини з акцентом на аналіз роботи піногенераторів в умовах змінного тиску та витрати рідини. З огляду на зростаючі вимоги до енергозбереження, зменшення викидів та ефективного використання ресурсів у промисловості, актуальним є визначення оптимальних параметрів функціонування піногенераторів, які дозволяють забезпечити стабільне утворення піни з мінімальними енергетичними затратами. У дослідженні використано метод чисельного моделювання процесів у програмному середовищі FlowSimulation (SolidWorks), що дало змогу побудувати математичну модель роботи піногенератора та розрахувати коефіцієнти енергоефективності при різних експлуатаційних режимах. Проведено аналіз впливу змін витрати рідини (від 0,001 до 0,025 м³/с) та тиску (від 6 до 12 МПа) на ефективність функціонування пристрою. Встановлено, що найбільш оптимальним є режим з витратою рідини 0,015 м³/с і тиском 8 МПа, при якому досягається найвище співвідношення продуктивності до енергоспоживання. За межами цього діапазону ефективність знижується: при зменшенні витрати до 0,001 м³/с коефіцієнт енергоефективності становить 1–1,09, а при збільшенні до

0,025 м³/с – 1,14–1,45. Отримані результати мають прикладне значення для оптимізації технологічних процесів очищення рідин та модернізації промислових установок, сприяючи зниженню енергозатрат, підвищенню ефективності виробництва та поліпшенню екологічних показників. Стаття може слугувати науково-практичною основою для подальших досліджень у сфері енергозбереження, автоматизації систем очищення та екологічної безпеки технологічного обладнання. Запропонований підхід також може бути адаптований до інших видів обладнання, де ефективність залежить від динаміки гідравлічних параметрів, що відкриває перспективи для розвитку комплексних енергоощадних технологій у різних галузях промисловості.

Ключові слова: блок очистки, конструкція, піногенератор, струмень, енергоефективність, тиск, піна.

Maksym Knysh, Tetiana Surzhko

RESEARCH OF THE EQUIPMENT OF THE WASHING LIQUID PURIFICATION UNIT WITH ANALYSIS OF THE ENERGY EFFICIENCY OF FOAM GENERATORS IN CONDITIONS OF VARIABLE PRESSURE AND LIQUID FLOW

The article considers the issue of increasing the energy efficiency of the equipment of the washing liquid purification unit with an emphasis on the analysis of the operation of foam generators under conditions of variable pressure and liquid flow. Given the growing requirements for energy conservation, emission reduction and efficient use of resources in industry, it is relevant to determine the optimal parameters of the functioning of foam generators, which allow ensuring stable foam formation with minimal energy costs. The study used the method of numerical modeling of processes in the FlowSimulation software environment (SolidWorks), which made it possible to build a mathematical model of the foam generator operation and calculate energy efficiency coefficients at different operating modes. The analysis of the influence of changes in liquid flow (from 0.001 to 0.025 м³/s) and pressure (from 6 to 12 MPa) on the efficiency of the device's operation was carried out. It was established that the most optimal mode is a liquid flow of 0.015 м³/s and a pressure of 8 MPa, at which the highest ratio of productivity to energy consumption is achieved. Outside this range, the efficiency decreases: when the flow rate decreases to 0.001 м³/s, the energy efficiency coefficient is 1–1.09, and when it increases to 0.025 м³/s, it is 1.14–1.45. The results obtained have applied value for optimizing technological processes of liquid purification and modernization of industrial plants, contributing to reducing energy costs, increasing production efficiency and improving environmental performance. The article can serve as a scientific and practical basis for further research in the field of energy saving, automation of purification systems and environmental safety of technological equipment. The proposed approach can also be adapted to other types of equipment, where efficiency depends on the dynamics of hydraulic parameters, which opens up prospects for the development of complex energy-saving technologies in various industries.

Keywords: cleaning unit, design, foam generator, jet, energy efficiency, pressure, foam.

І. Б. Рябова, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,
А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,
Л. А. Гарєв, аспірант

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН У ПРОМИСЛОВОСТІ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: холодильна машина, компресор, пластинчатий теплообмінник, енергоефективність, енергія, промислові процеси, теплоенергетика.

Вступ. Аналіз виробничих процесів харчової промисловості та агропромислового комплексу України [1] вказує на типовість структури схем енергоспоживання підприємств. Тепло до процесів підводиться гарячими утилітними потоками, а відводиться холодними утилітними потоками. Різні технології виготовлення, переробки, зберігання продуктів вимагають охолодження технологічних потоків до досить низьких температур. Ці технології забезпечуються низькотемпературними холодильними утилітами, які виробляють у холодильних установках різного типу.

Постановка проблеми. В статті розглядаються можливості збільшення потенціалу енергоефективності промислових парокомпресійних холодильних машин за допомогою використання сучасного теплообмінного обладнання.

Основна частина. Принципова схема енергоспоживання для низки харчових виробництв (виробництво молока та молокопродуктів, виробництво пива, вина, хлібопекарських дріжджів та деякі інші) наведена на рис. 1.

Джерелами теплової енергії, що подається до виробничих процесів парою та/або гарячою водою є котельня або ТЕЦ. Частина тепла витрачається на опалення, приготування гарячої води на виробничі та побутові потреби та власні потреби котельні. Відведення тепла, тобто охолодження технологічних потоків проводиться різними холодними утилітами залежно від цільових температур технологічних потоків. У багатьох виробництвах підприємств харчової промисловості потрібно охолодження цільових продуктів до температур в діапазоні від 0 до +8 °С (бродиння пива, охолодження термообробленого молока як готового продукту, охолодження вина для вилучення винного каменю, охолодження суміші у виробництві морозива і т.д.) [2, 3]. Як холодні утиліти в цих випадках використовують крижану воду, розсоли (водні розчини CaCl_2 та NaCl), водні розчини пропіленгліколю та деякі інші рідини. Для забезпечення відповідного температурного потенціалу призначена холодильна установка, у випарнику якої відбувається охолодження утиліт холодоагентом, що випаровується.

Тепло, зняте у випарнику, передається в конденсаторі середовищі, що охолоджується: оборотній воді або потоку повітря (див. рис.1.):

$$Q_K = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} + W, \quad (1)$$

де W – робота, витрачена на стиск пари холодоагенту в компресорі.

У існуючих холодильних системах підприємств харчової промисловості України це тепло практично не використовується, тобто викидається в навколишнє середовище:

$$Q_K = Q_{\text{скид}} \quad (2)$$

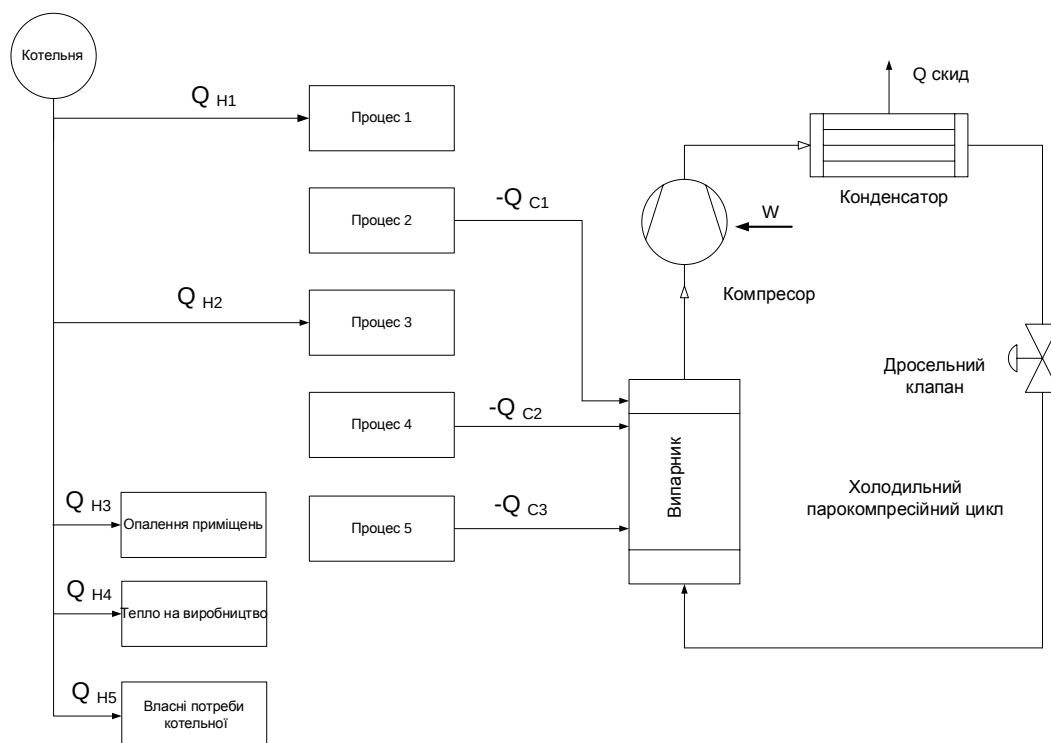


Рисунок 1 – Схема споживання гарячих, холодних утиліт промисловим підприємством з холодильним парокompресійним циклом

Аналіз холодильних систем вітчизняних харчових виробництв показує, що в основному в них як холодоагент застосовується аміак ($R717$). Аміак має сприятливі для його використання як холодоагенту теплофізичні властивості та високу термодинамічну досконалість [4, 5]. Аміак не руйнує озоновий шар ($ODP=0$) і не має прямої дії на збільшення парникового ефекту ($GWP=0$). Різкий характерний запах, властивий аміаку, який виявляється лише на рівні гранично допустимої концентрації у робочій зоні, є добрим індикатором витоку [6]. Негативними властивостями аміаку є токсичність, вибухонебезпечність та горючість при концентраціях, зазначених у ГОСТ 6221-90Е.

Потік парів аміаку після випарника надходить у компресорне відділення, де відбувається його стиснення до $10\text{--}15 \text{ кгс/см}^2$. При цьому аміак має найбільш суттєвий перегрів після стиснення серед холодоагентів, тому температура нагнітання парів аміаку після компресорного відділення становить $80\text{--}120^\circ\text{C}$. Охолодження перегрітої пари аміаку та конденсація відбувається в водяних або повітряних конденсаторах. Це тепло є таким, що викидається до навколишнього середовища :

$$Q_{OX} + Q_K = Q_{\text{скид}} \quad (2a)$$

де $Q_{ох}$ – кількість тепла, що віддається перегрітими парами аміаку при їх охолодженні до температури конденсації; Q_k – кількість тепла, що віддається парами аміаку за їхньої конденсації.

Результати обстеження аміачних холодильних установок українських підприємств харчової промисловості показали, що фактична кількість скидного тепла конденсаційного відділення є близькою за величиною до кількості тепла, що виробляється котельнею, проте, в основному, це тепло з невисоким температурним потенціалом, що визначається температурою конденсації насичених пар аміаку при стисненні (27–35 °С). Тепло, що відводиться при охолодженні перегрітої пари аміаку до температури конденсації, становить близько 15–20 % усієї кількості тепла після компресора, проте температурний потенціал цього тепла істотно вищий і складає 80–120 °С.

Утилізація скидного тепла після компресорної установки залежить від потреб технологічних процесів, теплопостачання та гарячого водопостачання в теплоносіях різних температурних потенціалів.

Розглянемо можливості підвищення енергоефективності підприємств з промисловими холодильними машинами. Функціональна схема виробництва твердого сиру представлена на рис. 2.

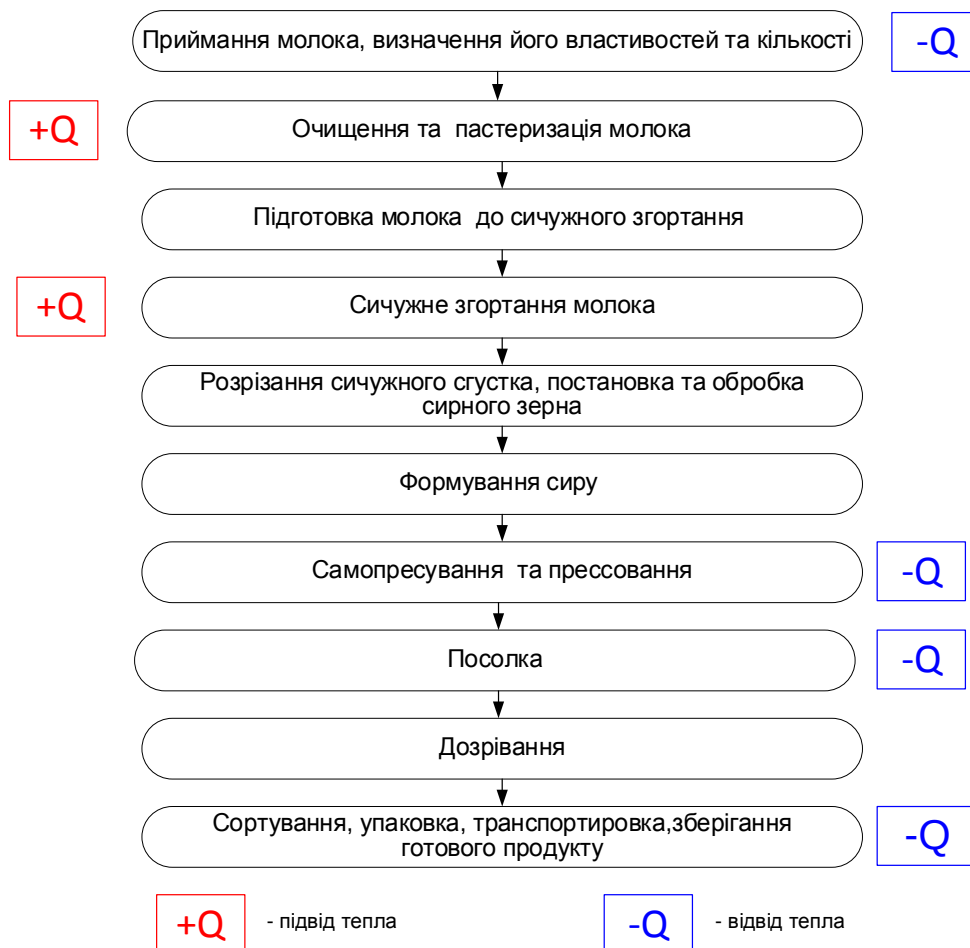


Рисунок 2 – Схема виробництва твердого сиру

Тепло з найвищим температурним потенціалом потрібно для пастеризації молока. Залежно від якості одержуваного молока для пластинчастих пастеризаторів темпе-

ратурою гарячої води, необхідною для нагрівання молока до температури пастеризації, є 78–90 °С. Слідом йде гаряча вода на опалення приміщень (50–80 °С), гаряча вода для промивання обладнання та інші потреби (50–60 °С), гаряча вода на сичужне згортання молока (28–34 °С) – перше нагрівання, 36–58 °С – друге нагрівання в залежності від сорту сиру. У деяких виробництвах термічну обробку одержуваного молока не виробляють з метою підвищення його сиропридатності [2]. Крім того, потрібно підігріти сирю води до 30–32 °С перед хімічною водопідготовкою котельні.

Теплова енергія, яку необхідно відвести від парів аміаку після компресора (відділення конденсації) не використовується. Вирішити задачу утилізації тепла газоподібного аміаку можна за допомогою пластинчастого теплообмінного апарату за рахунок високого ступеня рекуперації теплової енергії в теплообміннику.

Високоєфективні пластинчасті теплообмінники застосовуються в холодильній техніці як випарники, конденсатори, маслоохолоджувачі для аміачних і фреонових холодильних установок, охолоджувачі молока, пива, води, масел, газів, хімікатів, конденсатоохолоджувачі в системах тепlopостачання, утилізаторів тепла. У холодильних установках молочної промисловості можуть використовуватися напівзварні, зварні, нікельпаяні, міднопаяні та розбірні пластинчасті теплообмінні апарати.

Напіврозбірні теплообмінники (рис. 3) застосовуються як в аміачних, так і у фреонових циклах, де можна дозволити використовувати безпосереднє охолодження кінцевого продукту за рахунок надійного поділу теплоносія та холодоагенту. У напіврозбірних пластинчастих теплообмінниках зварні канали чергуються з каналами, які герметизуються традиційними прокладками. Холодоагент циркулює по зварних каналах, з ним контактують тільки дві кільцеві прокладки в отворах, що з'єднують канали. Ці прокладки виготовляються з особливо стійких матеріалів і встановлюються без клею, що спрощує їх заміну. Канали вторинного холодоносія ущільнюються звичайними прокладками з еластомеру. Подвійне ущільнення та пластини з корозійно-стійкого матеріалу запобігають змішуванню циркулюючих середовищ, забезпечують відсутність механічних напруг у зварних швах, а також роблять конструкцію гнучкою і при цьому вібростійкою.

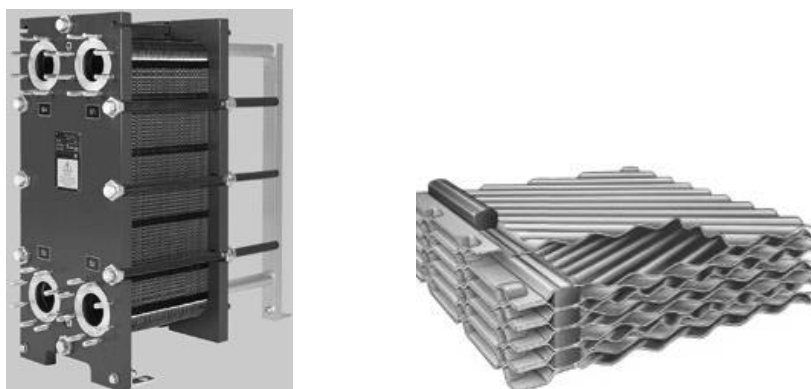


Рисунок 3

Конструктивні особливості пластинчастих теплообмінних апаратів дозволяють легко об'єднати в одному агрегаті кілька таких теплообмінників, наприклад, з двох напіврозбірних пластинчастих теплообмінників можна скомпонувати один агрегат з функціями "предконденсатор/конденсатор" або "маслоохолоджувач/конденсатор" (рис. 4). Це дозволяє конструювати агрегати, що мають одну раму, але виконують дві функції, що

знижує витрати, а також зменшує габарити обладнання та місце на підлозі. При необхідності підвищення продуктивності або зміни температурного режиму поверхню теплопередачі можна збільшити, встановивши додаткові касети. Діапазон продуктивності напіврозбірних апаратів від 50 до 8000 кВт [7].

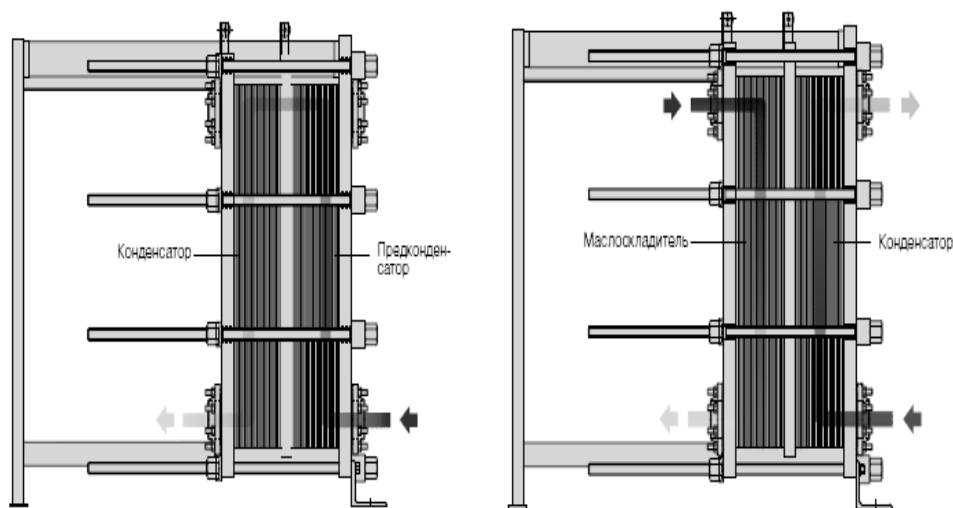


Рисунок 4

Оскільки в пластинчастому теплообміннику середовище тече через канали з гофрованими стінками, а теплообмін здійснюється через тонкі пластини, ефективність теплопередачі надзвичайно висока. Турбулентність потоку перешкоджає утворенню відкладень і збільшує коефіцієнт теплопередачі, що дозволяє ефективно використовувати його навіть при малій різниці між температурою випаровування і температурою води, що охолоджується. Це, своєю чергою, забезпечує економію експлуатаційних витрат завдяки високому холодильному коефіцієнту. Застосування напіврозбірних пластинчастих теплообмінників дає наступні практичні переваги:

- менша вага
- менший простір, що займається
- менша маса холодоагенту, що заправляється.

Напіврозбірний пластинчастий теплообмінник складається з попарно зварених пластин, що утворюють канали, обмежені зварюванням, так звані касети. Існують три типи каналів, що утворюються суміжними пластинами і відрізняються кутом між гофрами пластин:

L-канали – призначена для роботи при великих значеннях витрати середовищ і різниці температур (температури середовища, що охолоджується, на виході і охолоджуючого середовища на вході).

M-канали – призначені для роботи при середніх значеннях витрати та різниці температур.

H-канали призначені для роботи при низьких значеннях витрати та різниці температур.

M-канали складаються з однієї *L*-пластини та однієї *H*-пластини.

Для охолодження агресивних рідин можна використовувати пластини зі спеціальних матеріалів.

Напівзварний пластинчастий теплообмінник витримує різкі перепади температур, а через близьке розташування точок кріплення в ньому не виникають вібрації. У напівзварному пластинчастому теплообміннику немає цільнозварного пакета пластин, оскільки касети ущільнюються між собою через еластичні прокладки. Це значно підвищує надійність конструкції пакета при циклічних навантаженнях, і навіть при локальному замерзанні.

Зварний пластинчастий теплообмінник являє собою пакет гофрованих пластин, з'єднаних методом лазерного або дифузійного зварювання. Гофри на сусідніх пластинах спрямовані у протилежні сторони. Цей пакет змонтований на рамі між нерухомою та рухомою плитами, які скріплені стяжними болтами. Приєднувальні патрубки розташовані на передній плиті та мають ущільнення, яке приварюється до пакета пластин. Зварні теплообмінники застосовуються практично для роботи в ширшому діапазоні температур і тисків. Потужність від 50 до 3000 кВт. При виборі зварних теплообмінників на позицію конденсатора або охолоджувача перегрітої пари холодоагенту необхідно враховувати можливі циклічні навантаження, які обумовлюються компресійним обладнанням.

Нікельпаяні теплообмінники використовуються переважно в аміачних циклах на невеликих потужностях від 1 до 500 кВт.

Мідно-паяні теплообмінники широко застосовуються у фреонових холодильних циклах. Взаємодіючі середовища надійно розділені, що дозволяє використовувати безпосереднє охолодження. Спектр мідно-паяних теплообмінників значно розширюється останнім часом за рахунок створення принципово нових конструкцій.

Пластинчасті теплообмінники мають низку істотних переваг у порівнянні з кожухотрубчастими теплообмінниками, якими оснащені всі, спроектовані 20–30 років тому, холодильні системи в Україні [8]:

- невеликий внутрішній обсяг, завдяки чому кількість холодоагенту в системі вдається скоротити в 10 разів, особливо це актуально для аміачних систем;
- у 3 рази компактніше та більш ніж у 6 разів легше при однаковій потужності;
- високі значення коефіцієнта теплопередачі, за рахунок високої турбулентності та малої товщини пластин (приблизно в 2–4 рази вище, ніж у кожухотрубних) та, як наслідок – компактність, зменшення монтажних та експлуатаційних витрат, зменшення енерговитрат;
- ефективне використання теплової енергії (ККД до 99 %);
- за потреби є можливість збільшення поверхні теплопередачі (за рахунок збільшення кількості пластин) без встановлення додаткового теплообмінного обладнання;
- надійні та прості в установці та не вимагають спеціального фундаменту;
- не вимагають великих витрат за обслуговування, ремонт. Можливість 100 % очищення розбірних пластинчастих теплообмінників;
- зручність в експлуатації та довговічність.

Було розраховано та розроблено концептуальну схему модульну установку охолодження газоподібного аміаку на базі напівзварного пластинчастого теплообмінника. Основне завдання, що виконується установкою – утилізація теплоти перегрітої пари аміаку існуючої холодильної установки підприємства [9]. Принципова схема установки показана на рис. 5.

Потенціал тепла, яке можна отримати при охолодженні аміаку від температури нагнітання компресора 100–120 °С до температури конденсації 28–30 °С складає близько 600 кВт. Температура нагрітої води зі свердловини може становити від 50 °С до 75 °С.

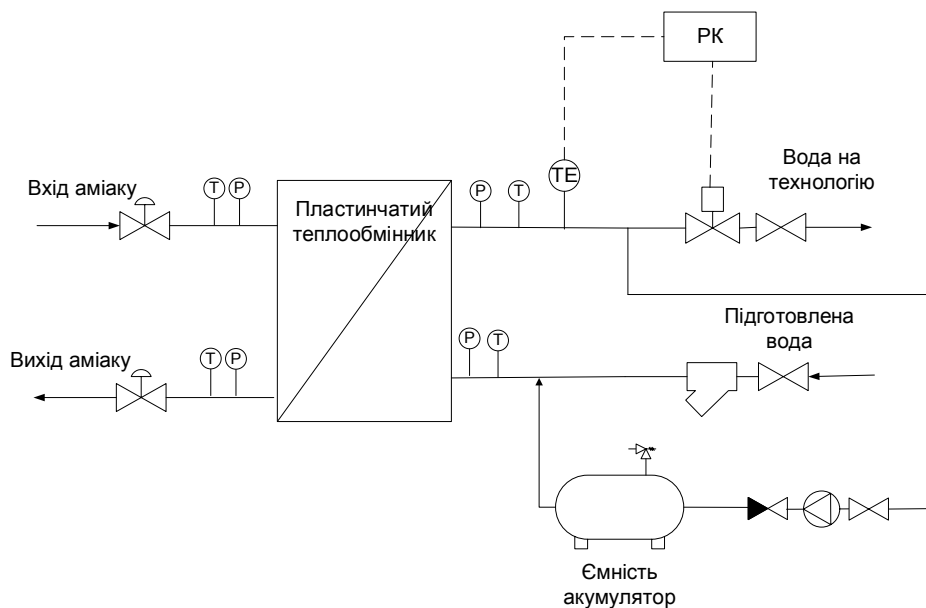


Рисунок 5 – Принципова схема модуля рекуперації тепла аміаку

Дане тепло можна використовувати у трьох напрямках:

- приготування гарячої води для технологічних потреб;
- приготування гарячої води для теплопостачання та гарячого водопостачання;
- підігрів сирої води, що надходить на водопідготовку котельної підприємства.

Теплоту в циклі охолодження можна утилізувати двома способами: використовувати всю теплоту конденсації для нагрівання води (або повітря) до відносно низької температури конденсації, або нагрівати в спеціальному охолоджувачі пари меншу кількість води до температури, близької до фактичної температури холодоагенту (в ПТО різниця температур може досягати 1–2 °C). Тепловий потенціал енергії конденсації при температурі до 35 °C надто низький для технологічних потреб, тому був обраний варіант використання теплової енергії газоподібного аміаку після компресору [10].

В результаті розрахунків, виконаних за допомогою відповідного програмного забезпечення, на позицію охолодження газоподібного аміаку був обраний напівзварний пластинчатий теплообмінник з товщиною пластини 0,6 мм. У системі автоматизації теплообмінного модуля передбачена установка автоматичного регулятора температури. В модулі підігріву води передбачений контур акумулювання теплової енергії у ємності-акумуляторі в тих режимах роботи підприємства, коли споживання гарячої води відсутнє.

Була досліджена можливість збільшення теплового потенціалу теплоносія, що нагрівається. Це можливо при застосуванні додаткової компресії холодоагенту з метою підвищення температури конденсації [11]. За допомогою програмного забезпечення UNISIM DESIGN був змодельований цикл холодильної установки – теплового насоса, де частина потоку парів аміаку компрімувалася і конденсувалася при тиску 2,7 МПа. (рис. 6).

Величина теплової енергії, отриманої при конденсації парів аміаку з температурою 61 °C склала 1,6 МВт. Ефективне використання цього тепла дозволило б скоротити споживання пари на підприємстві [12]. Однак, це технічне рішення пов'язане зі збільшенням капітальних витрат і необхідності встановлення нового обладнання. Дослідження щодо вдосконалення подібних технічних рішень будуть проводитись надалі.

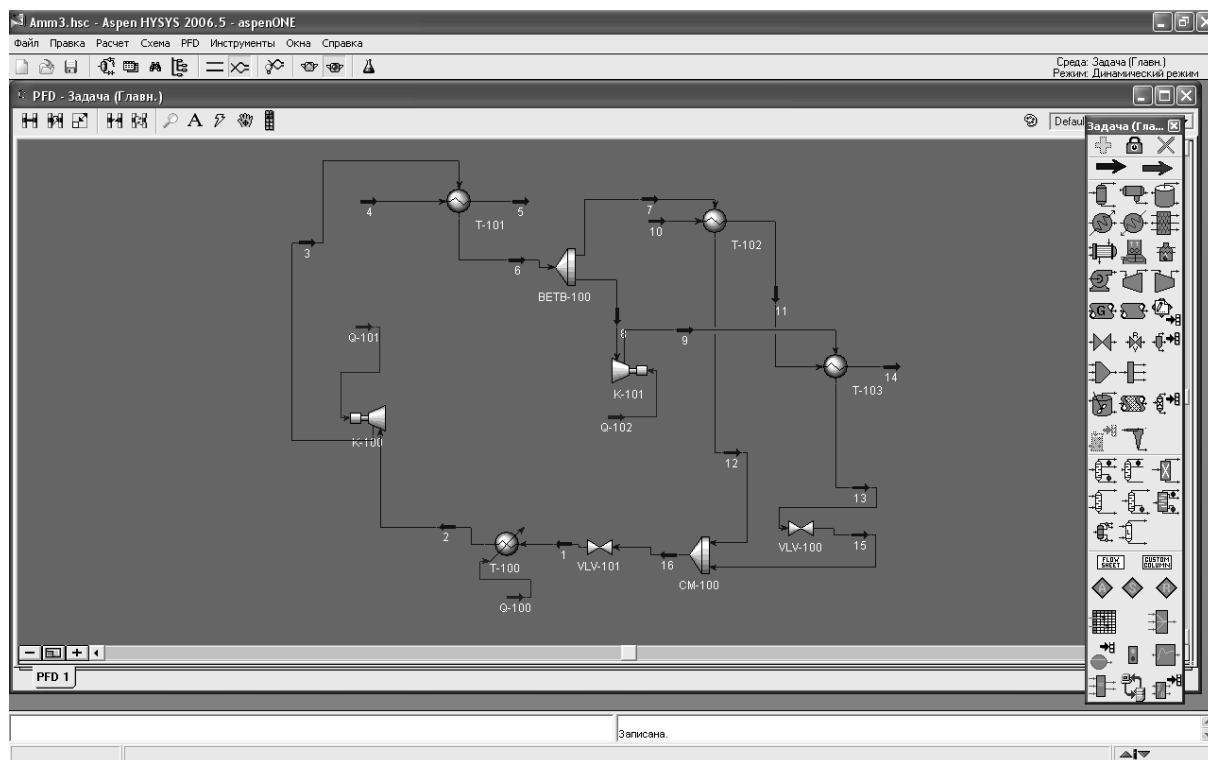


Рисунок 6

Висновки

Впровадження енергозберігаючих заходів, в яких використовується скидне тепло холодильної установки є важливими рішення в сучасних умовах щодо енергетичної безпеки та розвитку «зеленої» енергетики. Зниження вироблення тепла котельні за рахунок спалювання палива сприяє декарбонізації процесу і зменшенню забруднень навколишнього середовища. При розробці нових методів підвищення енергоефективності: використанні теплонасосних, ORC-технологій, та ін. необхідно враховувати індивідуальні техніко-економічні фактори для кожного конкретного підприємства, які зумовляватимуть доцільність впровадження енергозберігаючих технологій та обладнання, що може бути інтегрованої в промислові парокомпресійні холодильні машини.

Література

1. Бабанов І. Г., Гавва О. М., Бабанова О. І. та ін. Інноваційне обладнання молокопереробних підприємств : підручник. Київ : ІНКООС, 2019. 718 с.
2. Гулий І. С., Пушанко М. М., Орлов Л. О. Обладнання підприємств переробної та харчової промисловості / під ред. І. С. Гулого. Вінниця : Нова книга, 2001. 576 с.
3. Машкін М. І. Париш Н. М. Технологія виробництва молока і молочних продуктів : навч. видання. Київ : Вища освіта, 2006. 351 с.
4. Овчаренко В. С., Афонский В. Л. Основные аспекты комплексного подхода к расширению применения аммиачного оборудования в холодильной промышленности. *Холодильная техника*. 2001. №7. С. 13–15.
5. COOLSELECTOR 2 <https://www.danfoss.com/it-it/about-danfoss/news/dcs/coolselector-2-la-compressit%C3%A0-per-noi-lingegnosit%C3%A0-per-voi/>.

6. Железний В. П., Хлієва О. Я., Биковець Н. П. Робочі тіла холодильних установок. *Холод*. 2004. № 3. С. 22–25.
7. Stenhede C. Technical Reference Manual For Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Application. 5th edition. February 2nd. Kolding, Denmark : Alfa Laval AB, 2004, February 2nd. 178 p.
8. Мирончук В. Г., Орлов Л. О., Українець А. І. та ін. Розрахунки обладнання підприємств переробної і харчової промисловості. Вінниця : Нова книга, 2004. 288 с.
9. Tovazhnyanskyy L., Sherstyuk V., Kapustenko P. et al. Plate heat exchangers for environmentally friendly heat pumps. *Chemical Engineering Transactions*. 2007. Vol. 12. P. 213–217.
10. Panno G., Auguanno S., Messineo A., Panno D. Ammonia heat pump for energy saving in food industrial processes: the case of cheese factory. *IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement*. Ohrid, 2005.
11. Товажнянський Л. Л., Капустенко П. А., Хавин Г. Л., Арсеньєва О. П. Пластичные теплообменники в теплоснабжении : монографія. Харьков : НТУ «ХПИ», 2007.
12. Товажнянський Л. Л., Капустенко П. А., Ульянов Л. М. и др. Интеграция цикла аммиачного охлаждения в теплосеть сыро-молочного завода. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2005. № 2. С. 92–100.

Bibliography (transliterated)

1. Babanov I. G., Havva O. M., Babanova O. I., Zhitnetskiy I. V., Yastreba S. P. (2019). Innovatsiynе obladnannya molokopererobnih pidpriemstv: pidruchnik. Kyiv: INKOS, 718 p.
2. Hulyi I. S., Pushanko M. M., Orlov L. O. (2001). Obladnannya pidpriemstv pererobnoyi ta harchovoyi promyslovosti. I. S. Huloho (Ed.). Vinnytsia: Nova knyha, 576 p.
3. Mashkin M. I. Parysh N. M. Tekhnolohiia vyrobnytstva moloka i molochnykh produktiv: navch. vydannia. Kyiv: Vyshcha osvita, 351 p.
4. Ovcharenko B. C., Afonskiy V. L. (2001). Osnovnyie aspektyi kompleksnogo podhoda k rasshireniyu primeneniya ammiachnogo oborudovaniya v holodilnoy promyshlennosti. *Holodilnaya tekhnika*, 7, 13–15.
5. COOLSELECTOR 2 <https://www.danfoss.com/it-it/about-danfoss/news/dcs/coolselector-2-la-complessit%C3%A0-per-noi-lingegnosit%C3%A0-per-voi/>.
6. Zheleznyi V. P., Khliieva O. Ya., Bykovets N. P. (2004). Robochi tila kholodylnykh ustanovok. *Kholod*, 3, 22–25.
7. Technical Reference Manual For Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Application By Dr. Claes Stenhede/Alfa Laval AB Fifth edition, February 2nd, 2004. Alfa Laval AB.
8. Myronchuk V. H., Orlov L. O., Ukrainets A. I. et. al. (2004). Rozrakhunky obladnannya pidpriemstv pererobnoi i kharchovoi promyslovosti. Vinnytsia: Nova knyha, 288 p.
9. Tovazhnyanskyy L., Sherstyuk V., Kapustenko P., Khavin G. Perevertaylenko O., Boldyrev S., Garev A. (2007). Plate heat exchangers for environmentally friendly heat pumps. *Chemical Engineering Transactions*, 12, 213–217.
10. Panno G., Auguanno S., Messineo A., Panno D. (2005). Ammonia heat pump for energy saving in food industrial processes: the case of cheese factory. *IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement*, Ohrid, 2005.

11. Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. A., Havin G. L., Arseneva O. P. (2007). *Plastin-chatyie teploobmenniki v teplosnabzhenii: monografiya*. Kharkov: NTU «KhPI».
12. Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. A., Ulev L. M., Boldyirev S. A., Garev A. O. (2005). Integratsiya tsikla ammiachnogo ohlazhdeniya v teploset syiro-molochnogo zavoda. *IntegrovanI tehnologiyi ta energozberezhennya*, 2, 92–100.

УДК 66.048.05:665.6

І. Б. Рябова, К. О. Горбунов, А. М. Миронов, М. В. Ільченко, Л. А. Гарєв

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПАРОКОМПРЕСІЙНИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН У ПРОМИСЛОВОСТІ

Аналіз виробничих процесів харчової промисловості та агропромислового комплексу України вказує на типовість структури схем енергоспоживання підприємств з точки зору використання гарячих і холодних утиліт. Для забезпечення технологічних процесів утилітами з температурами, нижчими а температуру навколишнього середовища використовують промислові холодильні установки.

Збільшення потенціалу енергоефективності промислових парокомпресійних холодильних машин можна досягти за допомогою використання сучасного теплообмінного обладнання зокрема при утилізації теплової енергії низького потенціалу.

Специфікою підприємств харчової і переробної промисловості є сумісне використання гарячих і холодних утиліт при відносно невисоких температурах. Оскільки одним з поширених холодильних агентів є аміак, ця специфіка надає можливість частково знизити використання гарячих утиліт за рахунок утилізації теплоти, що скидається у довкілля при відводі теплоти від пари аміаку високого тиску. На прикладі виробництва твердого сиру показано, що розділенні процесу відводу теплоти від пари аміаку в конденсаторі компресійної холодильної машини на дві стадії дозволяє у першому теплообміннику відвести теплоту від перегрітої пари аміаку, що утворюється після компресії (температура пари сягає 80–120 °С при рівні компресії 1,0–1,5 МПа), на другій стадії відбувається процес безпосередньо конденсації аміаку при температурі 35 °С. Задачу утилізації тепла газоподібного аміаку можна вирішити за допомогою пластинчастого теплообмінного апарату через високий ступень рекуперації теплової енергії в теплообміннику. Додаткова компресія частини пари аміаку до 2,7 МПа надає можливість більш повно використати енергетичний потенціал пари аміаку через високу температуру конденсації (61 °С), але це вимагає серйозних додаткових капітальних витрат.

Впровадження енергозберігаючих заходів, в яких використовується низькопотенційне тепло холодильної установки, є важливими рішення в сучасних умовах щодо енергетичної безпеки та розвитку «зеленої» енергетики через зниження кількості вичного палива, що сприяє декарбонізації процесу і зменшенню забруднень навколишнього середовища.

Ключові слова: холодильна машина, компресор, пластинчатий теплообмінник, енергоефективність, енергія, промислові процеси, теплоенергетика.

I. B. Riabova, K. O. Gorbunov, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko, L. A. Hariev

RESEARCH ON POSSIBILITIES FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF VAPOR-COMPRESSION REFRIGERATORS IN INDUSTRY

Analysis of production processes of the food industry and agro-industrial complex of Ukraine indicates the typical structure of energy consumption schemes of enterprises from the point of view of the use of hot and cold utilities. To provide technological processes with utilities with temperatures lower than the ambient temperature, industrial refrigeration units are used.

Increasing the energy efficiency potential of industrial vapor-compressor refrigeration machines can be achieved through the use of modern heat exchange equipment, in particular when utilizing low-potential thermal energy.

The specificity of food and processing industry enterprises is the combined use of hot and cold utilities at relatively low temperatures. Since one of the common refrigerants is ammonia, this specificity provides an opportunity to partially reduce the use of hot utilities by utilizing the heat discharged into the environment during heat removal from high-pressure ammonia vapor. The example of hard cheese production shows that dividing the process of removing heat from ammonia vapor in the condenser of a compression refrigeration machine into two stages allows the first heat exchanger to remove heat from the superheated ammonia vapor formed after compression (the vapor temperature reaches 80–120 °C at a compression level of 1.0–1.5 MPa), and in the second stage, the process of direct condensation of ammonia occurs at a temperature of 35 °C. The problem of utilizing the heat of gaseous ammonia can be solved using a plate heat exchanger due to the high degree of thermal energy recovery in the heat exchanger. Additional compression of part of the ammonia vapor to 2.7 MPa makes it possible to more fully use the energy potential of ammonia vapor due to the high condensation temperature (61 °C), but this requires serious additional capital costs.

The implementation of energy-saving measures that use low-potential heat from a refrigeration plant are important solutions in modern conditions regarding energy security and the development of "green" energy by reducing the amount of fossil fuels, which contributes to the decarbonization of the process and the reduction of environmental pollution.

Keywords: refrigeration machine, compressor, plate heat exchanger, energy efficiency, energy, industrial processes, thermal power engineering.

В. А. Стасов, А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент, Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор, С. М. Биканов, канд. техн. наук, доцент, Є. В. Краснокутський, канд. техн. наук, доцент

КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕПЛОВОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИРОДОЄМНОСТІ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: теплоенергетична інтеграція, природокористування, енергія, ресурси, хімічна індустрія, оптимізація.

Вступ. Енергетична криза 70-х років ХХ-го сторіччя змусила розвинуті держави підрахувати та оцінити запаси традиційних джерел енергії. Їхня обмеженість призвела до необхідності шукати нові, переважно відновлювані джерела енергії. Найбільш корисним виявилось поєднання кількох видів енергії, одержуваної при згорянні кам'яного вугілля, сонячної теплової та фотоелектричної енергії, енергії вітру, атомного ядра, океану, енергії, що видобувається з біомаси, та деяких інших джерел. За існуючого рівня науково-технічного прогресу енергоспоживання може бути покрите лише за рахунок використання органічних палив (вугілля, нафти, газу), гідроенергії та атомної енергії. Однак, за результатами численних досліджень, органічне паливо у недалекому майбутньому може задовольнити запити світової енергетики лише частково. Залишок енергоспоживання може бути задоволений за рахунок інших джерел енергії – нетрадиційних.

Дедалі частіше питання інтеграції теплової енергії постає на промислових підприємствах. Це пов'язано з тим, що велика кількість енергії викидається до атмосфери у вигляді парникових газів, негативно впливаючи на екологію. У контексті розвитку індустрії, де велика кількість теплових процесів здійснюється паралельно, інтеграція здатна значно підвищити загальну теплову ефективність та знизити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Наведений комплексний огляд розглядає основні аспекти інтеграції теплових систем, зокрема визначення оптимальних точок взаємодії між процесами, використання теплових насосів, теплової акумуляції та інших новітніх технологій для підвищення теплової ефективності виробництва.

Постановка цілей. Метою даного дослідження є системне узагальнення поточних знань про методи ефективного використання тепла та енергії за допомогою інтеграції хіміко-технологічних процесів. Інтеграція в контексті даної роботи передбачає такий підхід до пов'язання, оптимізації та покращення промислових систем, які виробляють, споживають або використовують тепло та дозволяють значно підвищити енергетичну ефективність виробничих операцій. Робота включає розгляд ключових аспектів інтеграції: визначення оптимальних точок взаємодії між тепловими процесами, використання теплових насосів, теплообмінного обладнання та контекстуально доступних на підприємствах технологій. Також розглянуті принципи втілення інтеграції у різних галузях, включаючи багатотоннажне виробництво, теплостачання, харчову і хімічну промисловість та інші сфери використання наведених підходів та прийомів. Загальну ціль роботи можна визначити як виділення потенціалу інтеграції теплових процесів для оптимізації енергетичного балансу та природоємності у різних секторах промисловості.

Матеріали. Сучасні промислові процеси побудовані таким чином, що майже кожне велике підприємство здійснює викиди тепла та речовин пропорційно до темпів випуску товарної продукції. Найбільш парадоксально, що при цьому основними забруднювачами навколишнього середовища є генеруючі потужності та хіміко-переробна сфера, які у якості сировини використовують або споживають природні блага. Разом з тим, саме тут спостерігається найбільш очевидний потенціал енергоресурсозбереження та відповідального природокористування, оскільки чималу кількість теплової енергії від скидних речовин можна використати повторно – тобто, інтегрувати до виробництва у якості теплоносія для наступних операційних циклів.

Спочатку розглянемо загальноенергетичну сферу. До найважливіших проблем, пов'язаних зі спалюванням органічного палива на теплових електростанціях, відносяться викиди в навколишнє середовище, які відбуваються здебільшого внаслідок неможливості організації безвідходного виробництва. Особливістю енергетичного виробництва є безпосередній вплив на природне середовище в процесі вилучення палива та його спалювання. В результаті повного згоряння палива у повітряному середовищі у димових газах утворюються вуглекислий газ, водяні пари, азот, оксиди сірки, оксиди азоту та зола, які викидаються в атмосферу. Наявність шкідливих газоподібних продуктів згоряння органічних палив в атмосфері призводить до руйнування озонового шару, утворення фотохімічних туманів [1].

У різних виробничих та хімічних процесах теплота димових газів може бути використана для підтримки оптимальної температури та теплопостачання обладнання. Димові, або топкові, гази відносяться до найбільш давно застосовуваних нагрівальних агентів. Топкові гази (ТГ) не втратили свого значення й дотепер, оскільки дозволяють здійснювати нагрівання до високих температур, що досягають 1000-1100°C, при незначному надмірному тиску у теплообміннику (з боку газів). Найчастіше ТГ використовують для нагрівання через стінку інших нагрівальних агентів проміжних теплоносіїв [2].

Також тепло димових газів (ДГ) використовується в процесі когенерації. Тепло ДГ у цьому випадку використовують для виробництва пари або гарячої води, які потім призводять турбіни у рух для генерації електроенергії. Це дозволяє збільшити загальну ефективність процесу та знизити втрати тепла [3].

Димові гази використовуються в технології сушіння, а саме – у деяких сушильних апаратах по типу пневматичних, та у барабанних апаратах. У таких галузях, як сільське господарство та харчова промисловість, ДГ можуть бути використані для сушіння сільськогосподарських продуктів чи інших матеріалів [4].

Найбільш суттєвими недоліками ТГ є нерівномірність нагріву, обумовлена охолодженням газу у процесі теплообміну, труднощі з регулюванням температури обігріву, низький коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки, можливість забруднення матеріалів, що нагріваються, продуктами неповного згоряння палива (при безпосередньому обігріванні газами). Значні перепади температур між ТГ та середовищем, що нагрівається, створюють «жорсткі» умови нагрівання, які неприпустимі для багатьох продуктів та можуть викликати їх перегрів. Через відносно низьку питому теплоємність ТГ їхні об'ємні витрати доволі великі й транспортування вимагає значних витрат. Тому ТГ зазвичай використовують безпосередньо на місці їх отримання [2].

У свою чергу тепло відпрацьованої пари можна використовувати у більших масштабах, тобто перегріта пара використовується для виробництва електроенергії, наприклад на АЕС, а також у системах централізованого теплопостачання для опалення та гарячого водопостачання житлових будівель [5].

Підчас інтеграції тепла відпрацьованої пари можна використовувати процес когенерації, як і у випадку з димовими газами, але у когенераційних установках, які обслуговують централізовані системи теплопостачання, пара, яка покидає турбіну, конденсується у теплообмінниках та прямує до споживачів у вигляді гарячої води. У коге-

нераційних установках промислових підприємств відпрацьована у турбіні пара повертається на підприємство для використання її теплової енергії. На ТЕЦ протитиск пари нижчий, ніж на промислових когенераційних установках з протитиском, тому співвідношення електричної та теплової енергії у промислових когенераційних установок нижче, ніж у ТЕЦ [6].

Якщо нехтувати процесом утилізації тепла відпрацьованої пари на ТЕЦ, це лише сприятиме виникненню парникового ефекту – тобто, відбувається вторинне теплове забруднення, а жодних корисних результатів при цьому не формуватиметься. До того ж, певна частина тепла ТЕС потрапляє у довкілля через конденсатори турбін, що й так є технологічно не виключеним стоком енергії, який поки що не вдається переглянути [7].

Тому слід звернути увагу на переваги утилізації такої пари: можливість її використання не тільки для санітарно-технічних споживачів, але й для технологічних потреб; швидкий прогрів та охолодження систем парового опалення, що доцільно використовувати для приміщень із періодичним опаленням. Пара має невелику об'ємну масу, що дозволяє не враховувати у парових системах опалення гідростатичний тиск та дає можливість використати її як теплоносій в багатоповерхових будинках, а також при складному рельєфі місцевості району теплопостачання. Нарешті, дуже значну роль відіграє відсутність витрат електроенергії на саме транспортування пари [5].

У технічних та інженерних застосунках внаслідок перегріву пари або збільшення тиску в парових системах понад значення, при якому вона повинна конденсуватися, може виникати так зварна гостра пара (ГП). Ця пара вільна від будь-якої рідини й не утворює водяних крапель при незначному охолодженні [8]. Традиційно тиск ГП використовується у промислових процесах, де потрібно створити рух, тиск чи механічну роботу. У загальному випадку енергія надлишкового тиску пари може бути використана для приводу обладнання. ГП, як й відпрацьована пара, негативно впливає на навколишнє середовище. Якщо ГП не використовується для роботи або інших корисних цілей, це здатне призвести до надмірного споживання палива або електроенергії, що у свою чергу може збільшити викиди парникових газів та негативний вплив на клімат. Для того, щоб зменшити антропогенне навантаження на довкілля, слід доцільно використовувати енергію надлишкового тиску в системі, тобто – здійснити інтеграцію. У цьому випадку можна використати процес когенерації: пара під високим тиском прямує до парової турбіни, де її тиск використовується для приведення в рух механізмів, які, у свою чергу обертають генератор, що виробляє електроенергію. Тиск в конденсаторі цієї турбіни підтримують таким, щоб температура насичення пари була достатньо високою для необхідного нагрівання охолоджувальної води у конденсаторі. Нагріта у конденсаторі вода прямує споживачам для опалення. Тепло, яке утворюється в процесі експлуатації парової турбіни, використовується для обігріву води в системі опалення, виробничих процесів або інших цілей, які потребують застосування теплової енергії [9].

Для того, щоб використати теплоту, яка віддається парою охолоджувальній воді в конденсаторі, необхідно збільшити тиск, за якого конденсується пара. Підвищення нижньої температури циклу призведе до зменшення термічного ККД й водночас до зменшення кількості виробленої електроенергії. Тому з економічної точки зору подібна операція не є вигідною. З іншого боку, це надає можливість одержати велику кількість тепла для технологічних та побутових цілей, оскільки відпадає необхідність у будівництві котлів для опалювання, які нераціонально використовують теплоту високого температурного потенціалу під час спалювання типового для них палива.

Оскільки фізико-хімічна природа вторинної пари не відрізняється від ГП, цілком доцільно впроваджувати системи з її повторного використання та утилізації, як на стадії проектування, так і при модернізації існуючих парових систем. Найбільше застосування знаходить насичена водяна пара, що характеризується високими значеннями питомої теплоти конденсації та коефіцієнта тепловіддачі. Нагрівальну пару подають до

міжтрубного простору нагрівальної камери, де вона конденсується. Тепло, що виділяється при конденсації насиченої пари, передається через стінки кип'ятильних трубок розчину. У трубах нагрівальної камери розчин нагрівається та кипить з утворенням вторинної пари [10]. У такому контексті виглядає абсолютно логічним та доцільним боротися за те, щоб використовувати тепло вторинного кипіння, яке являє собою енергетичний потенціал продукції, побічних та проміжних речовин, що утворюється в технологічних агрегатах (установках) та втрачається у самому агрегаті, але який можна частково або цілком використати для енергопостачання іншим споживачам. Раціональне використання такого тепла є одним з найбільших резервів економії палива, що сприяють зниженню паливо- та енергоємності промислової продукції [11].

Прикладом використання такого тепла є процес випарювання в багатокорпусних протиточних випарних апаратах. Вихідний розчин подається насосом у останній по ходу нагрівальної пари корпус, з якого випарений розчин перекачується до попереднього корпусу, і т. д., причому з першого корпусу видаляється остаточно випарений розчин. Свіжа (первинна) пара надходить у перший корпус, а вторинна пара з цього корпусу направляється для обігріву другого корпусу, а надалі вторинна пара з попереднього корпусу використовується для обігріву наступного. З останнього корпусу вторинна пара видаляється в конденсатор [12]. Однак необхідність перекачування випарюваного розчину з корпусів, де тиск є меншим, до корпусів з більш високим тиском виступає серйозним недоліком протиточної схеми, оскільки застосування проміжних циркуляційних насосів пов'язане зі значним зростанням експлуатаційних витрат [13].

При інтеграції процесу випарювання вторинну пару цілком можна використовувати у якості гарячої утиліти. Після того як вторинна пара віддала своє тепло, вона конденсується та виливається до каналізації, тим самим частково забруднюючи навколишнє середовище. Але тепло вторинної пари також можна використовувати у процесі когенерації. Наприклад, використати пару для приводу турбіни, яка виробляє електроенергію в генераторі. Після проходження турбіни пара конденсується за допомогою охолодження, при цьому ефективно віддаючи тепло. Використання тепла для опалення та гарячого водопостачання – абсолютно очевидний та доволі популярний прийом. Тепло, яке виділяється під час конденсації, може бути спрямовано на опалення приміщень або на підігрів води для гарячого водопостачання. Таким чином одночасно зменшуються викиди парникових газів до атмосфери та знижується ресурсоємність процесу [14].

Окрім того, у деяких хімічних та фізичних процесах тепло вторинної пари можна використовувати більш нестандартно. Наприклад, відомі декілька застосунків:

1) вторинна пара використовується для дистиляції води, видаляючи солі та домішки з сирової води та створюючи питну воду [15];

2) вторинна пара використовується для виробництва льоду в комерційних або промислових масштабах [16];

3) вторинна пара використовується у харчовій промисловості для термічної обробки продуктів (сушіння, стерилізація або пастеризація) [17].

На сучасних промислових підприємствах багатьох країн часто просто скидають рідкі та газоподібні технологічні відходи в атмосферу чи каналізацію. В результаті втрачається корисне тепло, відбувається забруднення довкілля, погіршується екологічна обстановка у населених пунктах [18]. Утилізація низькопотенційного тепла забруднених шахтних вод здійснюється встановленням у контурі шахтної води спіральних теплообмінників з дискретними турбулізаторами та створенням проміжного контуру. Таким чином, здійснюється трансформація низькопотенційної теплової енергії у високопотенційну, при цьому величина одержуваної високопотенційної дорівнює сумі енергії, отриманої у випарнику, та енергії, витраченої на привід компресора [19].

Особливе місце серед хіміко-технологічних потоків, що традиційно виступають джерелами нераціонально утилізованої високопотенційної теплової енергії, є системи

промислових стоків нешкідливих та слабкозабруднених речовин. Існує чотири основні можливі місця в каналізаційній системі для рекуперації енергії зі стічних вод: на рівні компонентів; на рівні будівлі; у каналізаційній мережі та на очисних спорудах [20].

Рекуперація тепла на рівні компонентів: тепло витягається за допомогою вертикального теплообмінника безпосередньо після компонента, який використовується в роботі. Утилізоване тепло можна використовувати для попереднього нагріву холодної води, що надходить, наприклад, до побутових або комерційних душових, або застосовувати разом з тепловим насосом для інших цілей [20].

Рекуперація тепла на рівні будинку: на цьому рівні для рекуперації тепла стічні води зазвичай збираються в накопичувальному резервуарі, а тепло відновлюється за допомогою теплообмінника або теплового насоса з джерелом води. Для запобігання забрудненню зазвичай використовується система жироловлівачів, яка перехоплює жири та сміття зі стічних вод. Якщо рекупероване тепло не використовується одразу, його можна зберегти в резервуарі з гарячою водою для подальшого використання [20].

Рекуперація тепла на рівні каналізаційної мережі з неочищених стічних вод у суспільних каналізаційних системах також є перспективним джерелом енергії. Потік стічних вод в каналізаційних системах доволі є рясним та безперервним протягом року, з річною температурою 10–20 град, що робить стічні води з труб ідеальним джерелом опалення/охолодження для теплових насосів цілорічно.

Рекуперація тепла на рівні очисних споруд: такі станції переробляють та очищають великі обсяги стічних вод з каналізаційних систем, а потім щодня скидають їх у прилеглі водойми. Температура очищеної води стабільна і має вкрай невеликі добові та щотижневі коливання порівняно із температурою припливної води. Навіть у вологу погоду температура стоків не має настільки хаотичних коливань, як у припливів [20].

Водночас, серйозною проблемою системи добування тепла стоків є забруднення теплообмінників. У загальному значенні, засмічення – це накопичення небажаних відкладень на поверхні теплообмінника. Воно збільшує термічний опір теплообмінника, чим перешкоджає максимально ефективному теплообміну. Через стійкість забруднення ефективність теплообмінника знижується, що призводить до меншої економії енергії. Окрім того, забруднення збільшує витрати на технічне обслуговування пристрою [20].

Наступний величезний пласт некоректно утилізованої теплоти – це операції зміни тиску та технологічні процеси, де спостерігаються відповідні явища. Наприклад, надлишковий тиск може сприяти витoku природного газу з газопроводів, свердловин або інших інфраструктурних об'єктів. Ці витoki можуть містити метан, який є основним компонентом природного газу та сильним парниковим газом. Викиди метану до атмосфери здатні посилювати інтенсивність глобального потепління та різко негативно впливати на клімат [21].

Як відомо, магістральні газопроводи працюють з робочим тиском 5,5–7,4 МПа. Потім газ редукується на газорозподільній станції (ГРС) до 0,3; 0,6 або 1,2 МПа та подається до розподільчої мережі і далі – на ГРП та споживачам. При цьому енергія надлишкового тиску просто безцільно втрачається.

У турбодетандерних установках відбуваються явища іншого характеру. Процес розширення газу в утилізаційних турбодетандерних установках близький до ізоентропійного, що забезпечує одержання максимальної величини енергії з одиниці маси установки, а, отже і мінімальної собівартості виробництва. Турбодетандерні утилізаційні установки застосовуються на компресорних станціях магістральних газопроводів, газорозподільчих станціях, на газорегуляторних пунктах різних енергетичних об'єктів, наприклад, теплових електричних станцій та ін. Потужність турбодетандерів найчастіше використовується для приводу електрогенераторів [22]. Впровадженню турбодетандерів на газоспоживаючих підприємствах, наприклад, в опалювальних котельнях, перешкоджає, зокрема, відсутність фахівців-турбіністів, що потребує створення окремого це-

ху або підрозділу, відсутність інфраструктури для передачі надлишків електроенергії, що виробляється, в електричну мережу [23].

Для наведеного типу задач цілком підходить наступний приклад інтегрованої системи: попередньо підігрітий у підігрівачі газ з магістралі високого тиску проходить послідовно два ступені детандера. За рахунок розширення газу у дизель-генераторному агрегаті отримуємо електроенергію, яка передається до електричної мережі. Потім газ з тиском 0,5 МПа надходить у пневмоелектрогенераторний агрегат, де додатково з електроенергією у теплообміннику отримується холод. Підігрітий у теплообміннику газ з низьким тиском надходить споживачеві в магістраль низького тиску [24].

Технології утилізації теплової енергії дедалі частіше використовуються на об'єктах різного призначення: від промислових виробництв до приміщень громадського користування. Це зумовлено дефіцитом первинних енергоносіїв. Холодильні системи будівель – наприклад, супермаркетів або складів – для вироблення холоду витрачають велику кількість енергії. При цьому вони також виробляють значну кількість тепла. Ця тепла енергія утворюється в процесі конденсації газоподібного холодоагенту. У звичайних холодильних установках вона віддається навколишньому повітрі за допомогою конденсаторних блоків і зовсім не використовується корисно. Між тим, на сьогодні є не менше двох ефективних способів використання тепла холодильних агрегатів.

1. Рекуперація тепла для нагрівання води, що використовується для технологічних потреб або опалення. Цей метод дозволяє ефективно використати близько 20 % тепла, що виробляється холодильними установками. Накопичувальний бак (бойлер) підключається до холодильної системи через теплообмінник, в якому акумулюється гаряча вода або контур системи опалення. Оскільки температура холодоагенту наприкінці процесу стиснення може перевищувати 100 °С, середовище (повітря або вода) нагрівається до 80–90 °С. У випадках, коли холодильна машина не забезпечує необхідну продуктивність або не може працювати постійно, а ємності накопичувального бака недостатньо для підтримки температури, використовуються електронагрівачі або газові котли.

2. Використання тепла для повітряного опалення приміщень без використання теплоносія (торгова площа, склад, офісна зона). Цей спосіб набагато ефективніший і дозволяє використовувати майже 100 % тепла, що дозволяє нагрівати воду або повітря до 30 °С [25].

Компанія Mauekawa активно використовує ідею з реалізації «П'яти натуральних холодоагентів». Джерелом тепла для теплових насосів (ТН) високого тиску є тепло конденсації, що виробляється холодильною установкою. ТН стискає аміак, тим самим підвищуючи його температуру з 40 °С до 65 °С, що дозволяє виробляти воду з температурою 60 °С за температури вхідної води 12 °С. Нагрівання води з 12 °С до 60 °С забезпечується за рахунок застосування вискоєфективного теплообмінника на боці високого тиску теплового насоса, а також теплообмінника газ/рідина на лінії всмоктування [26].

Обговорення. Як видно, палітра технічних та технологічних можливостей для більш ефективного використання теплоенергоресурсів є доволі великою, а потенціал зниження ресурсоемності і впровадження підходів раціонального природокористування майже необмеженим за умови ретельного аналізу перспектив інтеграції матеріальних потоків на конкретних підприємствах з урахування їхньої специфіки.

Інтеграція тепла димових газів у промислових процесах на перше місце виносить підвищення енергоефективності та зменшення викидів в атмосферу. Використання тепла димових газів дозволить підприємствам зменшити споживання пального та енергетичні витрати. Крім того, якщо використовувати інтеграцію тепла ДГ раціонально, можна пропорційно зменшити обсяг шкідливих викидів до атмосфери, проте сама інтеграція може бути досить технічно складною й вимагати адаптації обладнання та проце-

сів. Інтеграція тепла ТГ у кожному випадку напряму залежить від конкретних технічних, економічних та регуляторних факторів.

Аналіз джерел теплових відходів показує, що близько 60 % скидного тепла є низькотемпературним (232 град та нижче). Утилізація такого тепла є менш ефективною з технічної та економічної точки зору, але саме цей вид теплових відходів присутній на підприємствах у великих кількостях, що нашоє на думку про те, що утилізацією низькопотенційних відходів нехтувати не варто. Як вже вказувалось вище, сучасні технології надають різні можливості рекуперації тепла відпрацьованих газів та застосування його з метою опалення і гарячого водопостачання, а також у технологічних цілях.

Парові системи мають свої особливості. Якщо існує значна різниця між надлишковим тиском гострої пари і тиском системи, яку намагаються жити, інтеграція може бути складною або вимагати встановлення дорогого обладнання для зниження тиску. Перспективи масового запровадження інтеграції енергії надлишкового тиску гострої пари є дуже гарними в контексті прагнення до сталого розвитку, підвищення енергетичної ефективності і зменшення впливу людської діяльності на навколишнє середовище. З економічної точки зору інтеграція надлишкового тиску може призвести до збільшення прибутковості, зменшення витрат та підвищення стійкості до зовнішніх ризиків, що робить цей підхід ще більш привабливим для власників бізнесу.

Одним з традиційних напрямків застосування вторинної пари є опалення цехів та виробничих приміщень за допомогою пароповітряних калориферів. Однак це актуально лише у опалювальний період, тоді як у теплу пору року гостро постає питання про кондиціювання та непридатність для цього вторинної пари. Тоді більшу перевагу має так зване послідовне використання вторинної пари в тому ж технологічному процесі, від якого був відведений конденсат високого тиску для отримання цієї вторинної пари. Ще одним суттєвим моментом виступає наявність споживача вторинної пари поблизу джерела конденсату високого тиску, оскільки транспортувати пару є проблематичним. Для цього знадобляться трубопроводи великого діаметра, що може зробити економічно недоцільним утилізацію вторинної пари взагалі. Загалом вторинна пара є побічним продуктом при експлуатації парових систем. Доцільно впроваджувати системи з її повторного використання та утилізації – як на стадії проектування, так і при модернізації існуючих парових систем. Це дозволить отримати найбільш результативний показник з енергозбереження та максимально швидко окупність проєктів реконструкції.

Забруднені стоки побутових, промислових та комерційних об'єктів зберігають значну кількість теплової енергії після скидання до каналізаційної системи. Це тепло можна відновити за допомогою добре відомих технологій – теплообмінників та теплових насосів – та повторно використовувати для задоволення потреб у опаленні. Традиційно цей ресурс суттєво недооцінюється, тому важливо розглянути кількісні показники. Так, за оцінками експертів у Швейцарії в каналізації втрачається 6000 ГВтч теплової енергії на рік, що еквівалентно 7 % загальної потреби цієї країни в опаленні. Водночас за тими ж оцінками стічні води у каналізаційних трубах у Німеччині містять достатньо енергії для обігріву 2 мільйонів будинків [19]. Насправді, інтеграція теплоти забруднених стоків – це важливий крок у напрямку сталих та ефективних систем управління відходами і стічними водами. Вона сприяє досягненню більшої екологічної стійкості, раціональному використанню ресурсів та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, що важливо для підтримання здоров'я планети та забезпечення життєздатності нашого суспільства.

У сферах видобутку енергоресурсів та виробництва енергії ситуація дещо інша – там чільну роль відіграють внутрішні процеси та технологічні обмеження. Наприклад, для мінімізації впливу надлишкового тиску природного газу на екологію важливо вживати заходи щодо виявлення та усунення витоків, а також дотримуватися суворих норм та стандартів у галузі безпеки та екології в газовій промисловості. Ці загалом очевидні

речі виступають чинниками стримування при інтеграції технологічних потоків. Тільки сучасні технології та методи можуть ефективно допомогти в управлінні: зниженні негативного впливу на навколишнє середовище шляхом теплоенергетичної інтеграції [21]. Здавалося б, подібні питання вже досить кваліфіковано вирішені на великих теплових електростанціях, які мають необхідні кадри та інфраструктуру, але у їхніх власників відсутня зацікавленість у впровадженні турбодетандерів, оскільки генерована цими пристроями електрична потужність становить зазвичай менше 1% від встановленої. Таким чином, на шляху широкого впровадження турбодетандерів у вітчизняній промисловості необхідно вирішити великий обсяг складних проблем: адміністративних, суто бізнесових та комплексних технологічних.

Висновок. Загальний аналіз існуючих напрямів теплоенергетичної інтеграції з урахуванням балансу складності, витрат та економічної доцільності чітко демонструє їхню перспективність. Серед запропонованих варіантів найбільш перспективним є напрямком інтеграції теплоти димових газів. Це обумовлено не тільки можливістю ефективного використання відхідної теплової енергії, але й порівняльною простотою технології, а також супутнім величезним потенціалом зниження екологічного впливу.

З іншого боку, цікаві перспективи пропонує й інтеграція теплоти відпрацьованої пари, яка теж забезпечує ефективне використання тепла в процесах виробництва. Однак, незважаючи на це, подібний напрямком модернізації вимагає складніших технологічних рішень та високих інвестицій.

Доволі неочікувано, але на сьогоднішній день найменш перспективною виглядає інтеграція теплоти забруднених стоків. У першу чергу, це пов'язано з високою складністю очищення та підготовки таких стоків, що може не тільки знизити економічну доцільність цього підходу, але й відвернути промисловців, які витрачатимуть на регенерацію води суми, співставні з собівартістю товару без застосування інтеграції.

Загалом, вибір найкращого напрямку теплоенергетичної інтеграції буде залежати від конкретних умов підприємства, враховуючи його профіль, технологічні можливості, наявні вторинні ресурси та матеріальне забезпечення, потенційні економічні ефекти та ступінь соціально-екологічної відповідальності.

Література

1. Коваленко Т., Коваленко П. Аналіз та оцінка впливу шкідливих викидів ТЕС України на навколишнє середовище. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/26866/1/013-036-039.pdf>.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 1973. 752 с.
3. Маляренко В. А., Шубенко О. Л., Андреев С. Ю. та ін. Когенераційні технології в малій енергетиці : монографія / Харків. Нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А. М. Підгорного. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 454 с.
4. Сажин Б. С. Основы техники сушки. Москва : Химия, 1984. 320 с.
5. Клімов Р. О. Конспект лекцій з дисципліни «Джерела теплопостачання та теплові мережі». Дніпродзержинськ : ДДПУ, 2016. 103 с.
6. Казарова І. О. Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації : кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Харків, 2017. 194 с.

7. Вітер Н. Г., Кавун Е. М. Утилізація та поводження з відходами : наукова брошура для організації лабораторно-практичних та семінарських занять студентів агрономічного факультету денної та заочної форми навчання з спеціальності 7.04010601 «Екологія та охорона навколишнього середовища». Вінницький національний аграрний університет, 2015. 180 с.

8. Конспект лекцій до розділу «Теплові процеси» з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв» : для студентів III–IV курсів усіх спеціальностей / уклад.: О. С. Смірнова, С. О. Опарін, А. О. Черемисінова. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2013. 106 с.

9. Конспект лекцій з курсу «Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів» для зд. вищої освіти за спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад.: Л. В. Іванченко, В. Я. Кожухар ; Нац. ун-т «Одеська політехніка». Одеса, 2024. 91 с.

10. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему «Розрахунок однокорпусної випарної установки» з курсу «Основні процеси та апарати хімічної технології» : для студентів IV–V курсів усіх спеціальностей і форм навчання / уклад.: Т. Ю. Гіріч, В. М. Задорожній, Т. П. Єльцова. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2009. 36 с.

11. Слободян Н. М. Аналітичний огляд основних схем використання відпрацьованого тепла. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. Вінниця, 27–28 квітня 2020 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8823>.

12. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. 2-е вид., доп. та випр. Харків : Світ Книг, 2014. 495 с.

13. Колач Т. Н., Радун Д. В. Выпарные станции. Москва : Машгиз, 1963.

14. Прядко М. О. Василенко С. М., Петренко В. П. Ефективність використання теплоти вторинних енергоресурсів (ВЕР) в теплових схемах цукрових заводів. *Цукор України*. 2014. № 8. С. 21–24.

15. Пирисунько М. А., Подвигін В. В. Особливості використання вторинних енергоресурсів в судновому енергетичному обладнанні. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. Миколаїв : НУК, 2023. С. 209–211.

16. Холодильна техніка. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. В. Гулієнко, О. В. Гусарова. Електронне мережне навчальне видання (1 файл: 6.83 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 148 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/129c97f0-b4dc-4984-9962-ca88d7419c20/content>

17. Бліщ Р. О., Петришин Н. З. Енергозберігаючі технології приготування пивного суслу. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2021. Вип. 28. С. 13–17.

18. Низькопотенційні джерела енергії: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Ю. П. Вишневецька, О. В. Козачук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 2,11 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 28 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/edfd3265-d5e9-48cb-8422-76e4d70d4c7f/content>

19. Низькопотенційні джерела енергії : лабораторний практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Ю. П. Вишневська, О. А. Мельник ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 1,34 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 31 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b633023b-f414-45cf-93cd-08d868a47408/content>
20. Nagpal H., Spriet J., Krishna et al. Heat Recovery from Wastewater – A Review of Available Resource. *Water*. 2021. Vol.13, Iss. 9. 1274.
21. Білецький В. С., Суярко В. Г., Сіренко В. І. та ін. Екологічна безпека у нафтогазовій промисловості : конспект лекцій / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2021. 175 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/54002>
22. Говдяк Р. М. Утилізація енергії тиску природного газу в турбодетандерних установках на об'єктах газової промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 1. С. 7–12.
23. Костенко Д. А., Дмитренко В.О. Енергозберігаючий потенціал надлишкового тиску природного газу у газотранспортній системі України. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 1. С. 54.
24. Гічов Ю. О. Проблеми теорії і технології перетворення і використання енергії : конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2011. 54 с.
25. Клименко В. В., Кравченко В. І., Телюта Р. В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках : навч. посіб. / М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : Ексклюзив-Систем, 2020. 220 с.
26. Хмельнюк М. Г., Подмазко О. С., Подмазко І. О. Холодильні установки та сфери їх використання : підручник. Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2014. 484 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kovalenko T., Kovalenko P. Analiz ta otsinka vplyvu shkidlyvykh vykydiv TES Ukrainy na navkolyshnie seredovyshche. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/26866/1/013-036-039.pdf>.
2. Kasatkyn A. H. (1973). Osnovnye processy i aparaty khymycheskoi tekhnolohyy. Moskva : Khymyia. 752 p.
3. Maliarenko V. A., Shubenko O. L., Andrieiev S. Yu., Babak M. Yu., Senetskyi O. V. (2018). Koheneratsiini tekhnolohii v malii enerhetytsi : monohrafiia / Kharkiv. Nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova, In-t problem mashynobud. im. A. M. Pidhornoho. Kharkiv : KhNUMH im. O.M. Beketova. 454 p.
4. Sazhyn B. S. (1984). Osnovi tekhniky sushky. Moskva: Khymyia. 320 p.
5. Klimov R. O. (2016). Konspekt lektsii z dystsypliny «Dzherela teplopostachannia ta teplovi me-rezhi». Dniprodzerzhynsk: DDPU. 103 p.
6. Kazarova I. O. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti system enerhopostachannia za rakhunok vprova-dzhennia koheneratsii: kvalifikatsiina naukova pratsia na pravakh rukopysu. Kharkiv. 194 p.
7. Viter N. H., Kavun E. M. (2015). Utylizatsiia ta povodzhennia z vidkhodamy: naukova broshura dlia orhanizatsii laboratorno-praktychnykh ta seminarskykh zaniat studentiv ahronomichnoho fakultetu dennoi ta zaochnoi formy navchannia z spetsialnosti 7.04010601 «Ekolohiia ta okhrona navkolyshnoho seredovyshcha». Vinnytskyi natsionalnyi ahraryni universytet. 180 p.

8. Konspekt lektsii do rozdiliv «Teplovi protsesy» z kursu «Protsey ta aparaty khimichnykh vyrobnytstv» : dlia studentiv III–IV kursiv usikh spetsialnostei. O. S. Smirnova, S. O. Oparin, A. O. Cheremysynova (uklad.). (2013). Dnipropetrovsk: DVNZ UDKhTU. 106 p.
9. Konspekt lektsii z kursu «Enerhotekhnolohiia khimiko-tekhnologichnykh protsesiv» dlia zd. vyshchoi osvity za spets. 161 «Khimichni tekhnolohii ta inzheneriia». L. V. Ivanchenko, V. Ya. Kozhukhar (uklad.); Nats. un-t «Odeska politekhnika». (2024). Odesa. 91 p.
10. Metodychni vказivky do vykonannia kursovoho proektu na temu «Rozrakhunok odnokorpusnoi vyparnoi ustanovky» z kursu «Osnovni protsey ta aparaty khimichnoi tekhnolohii» : dlia studentiv IV–V kursiv usikh spetsialnostei i form navchannia. T. Yu. Hirich, V. M. Zadorozhnii, T. P. Yeltsova (uklad.). (2009). Dnipropetrovsk: DVNZ UDKhTU. 36 p.
11. Slobodian N. M. (2020). Analitychnyi ohliad osnovnykh skhem vykorystannia vidpratsovanoho tepla. *Materialy XLIX naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv VNTU*. Vinnytsia, 27–28 kvitnia 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8823>.
12. Cherevko O. I., Poperechnyi A. M. (2014). Protsey i aparaty kharchovykh vyrobnytstv: pidruchnyk. (2nd ed.). Kharkiv: Svit Knyh. 495 p.
13. Kolach T. N., Radun D. V. (1963). Vyparnye stantsyy. Moskva: Mashhyz.
14. Priadko M. O. Vasylenko S. M., Petrenko V. P. (2014). Efektyvnist vykorystannia teploty vtorynnykh enerhoresursiv (VER) v teplovykh skhemakh tsukrovykh zavodiv. *Tsukor Ukrainy*, 8, 21–24.
15. Pyrysunko M. A., Podvyhin V. V. (2023). Osoblyvosti vykorystannia vtorynnykh enerhoresursiv v sudnovomu enerhetychnomu obladdanni. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: materialy XIV mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* (pp. 209–211). Mykolaiv: NUK.
16. Kholodylna tekhnika. Konspekt lektsii: navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za osvithoiu prohramoiu «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii proektuvannia obladdannia khimichnoi inzhenerii» spetsialnosti 133 «Haluzeve mashynobuduvannia». KPI im. Ihoria Sikorskoho. S.V. Hulienko, O.V. Husarova (uklad.). (1 fail: 6.83 Mbait). (2023). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 148 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/129c97f0-b4dc-4984-9962-ca88d7419c20/content>
17. Blishch R. O., Petryshyn N. Z. (2021). Enerhozberihaiuchi tekhnolohii pryhotuvannia pyvnoho susla. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 28, 13–17.
18. Nyzkopotentsiini dzherela enerhii: rozrakhunkovo-hrafichna robota: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Yu. P. Vyshnevskia, O. V. Kozachuk (uklad.). KPI im. Ihoria Sikorskoho. (1 fail: 2,11 Mbait). (2023). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 28 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/edfd3265-d5e9-48cb-8422-76e4d70d4c7f/content>
19. Nyzkopotentsiini dzherela enerhii : laboratornyi praktykum. [Elektronnyi resurs] : navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Yu. P. Vyshnevskia, O. A. Melnyk (uklad.). KPI im. Ihoria Sikorskoho. (1 fail: 1,34 Mbait). (2023). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 31 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b633023b-f414-45cf-93cd-08d868a47408/content>
20. Nagpal H., Spriet J., Krishna Murali M., McNabola A. Heat Recovery from Wastewater – A Review of Available Resource. *Water*. 2021, 13, 1274.

21. Biletskyi V. S., Suiarko V. H., Sirenko V. I., Fyk M. I., Orlovskyi V. M. (2021). Ekologichna bezpeka u naftohazovii promyslovosti: konspekt leksii. Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekn. in-t». Kharkiv. 175 p. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/54002>

22. Hovdiak R. M. (2014). Utylizatsiia enerhii tysku pryrodnoho hazu v turbodetandernykh ustanovkakh na ob'ekтах hazovoi promyslovosti. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 1. 7–12.

23. Kostenko D. A., Dmytrenko V. O. (2003). Enerhozberihaiuchy potentsial nadlyshkovoho tysku pryrodnoho hazu u hazotransportnii systemi Ukrainy. *Naftova i hazova promyslovist*, 1, 54.

24. Hichov Yu. O. Problemy teorii i tekhnolohii peretvorennia i vykorystannia enerhii : konspekt leksii. Dnipropetrovsk : NMetAU, 2011. 54 p.

25. Klymenko V. V., Kravchenko V. I., Teliuta R. V. (2020). Enerhozberezhennia v teplotekhnolohichnykh protsesakh ta ustanovkakh: navch. posib. Tsentralnoukrain. nats. tekhn. un-t. Kropyvnytskyi: Ekskliuzyv-System. 220 p.

26 Khmelniuk M. H., Podmazko O. S., Podmazko I. O. (2014). Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia: pidruchnyk. Kherson: FOP Hrin D. S. 484 p.

УДК 62-6:662.6/.9

В. А. Стасов, А. М. Миронов, М. В. Ільченко, Ю. А. Селіхов, К. О. Горбунов,
С. М. Биканов, Є. В. Краснокутський

КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕПЛОВОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИРОДОЄМНОСТІ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті представлено комплексний системний огляд методів теплоенергетичної інтеграції у хіміко-технологічних процесах з акцентом на підвищення енергоефективності, зниження викидів парникових газів та раціональне використання вторинних ресурсів, які виступають джерелами теплоти. Досліджено основні напрями утилізації відпрацьованого тепла, зокрема використання димових газів, гострої пари, вторинної пари, тепла побутових та промислових стоків, а також енергії надлишкового тиску в газорозподільних системах. Особливу увагу приділено технологіям когенерації, рекуперації, використанню теплових насосів та теплообмінного обладнання у різних галузях промисловості. Показано, що димові гази можуть бути ефективним джерелом повторного теплового використання завдяки високій температурі та поширеності у більшості теплових процесів. Водночас описано обмеження, пов'язані з нерівномірністю впливу їхнього теплового поля та високими витратами на транспортування. Розглянуто переваги та недоліки використання вторинної пари у процесах випарювання, дистиляції, сушіння, опалення та генерації електроенергії. Проаналізовано перспективи інтеграції у стічних і промислово-каналізаційних системах, що дозволяє зменшити екологічне навантаження та частково компенсувати втрати тепла. Наголошено на потенціалі рекуперації тепла на рівні компонентів, будівель, мереж та очисних споруд, визначено технічні складності впровадження через забруднення теплообмінного обладнання. Розглянуто феномен втрати енергії при редукуванні тиску у газопроводах, що відкриває можливості для впровадження турбодетандерів. У підсумку дослідження вказано на стратегічну важливість теплоенергетичної інтеграції як шляху до зниження ресурсоемності та підвищен-

ня стійкості промислових систем. Обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямом є утилізація тепла димових газів, хоча у залежності від галузі більш доцільними можуть виступати й інші варіанти. Практичне значення дослідження полягає у створенні теоретичного підґрунтя для впровадження енергоощадних рішень у промисловості на основі системної інтеграції теплових потоків.

Ключові слова: теплоенергетична інтеграція, природокористування, енергія, ресурси, хімічна індустрія, оптимізація.

V. A. Stasov, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko, Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov,
S. M. Bykanov, Ye. V. Krasnokutsky

A COMPREHENSIVE REVIEW OF METHODS OF SECONDARY ENERGY RESOURCES THERMAL INTEGRATION INTO TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR OPTIMIZATION THE NATURAL CAPACITY OF INDUSTRIAL PRODUCTS

The article presents a systematic review of heat-and-power integration methods into chemical-technological processes, focusing on enhancing energy efficiency, reducing greenhouse gas emissions and optimizing thermal resource utilization. The study investigates key directions for waste heat recovery, including the use of flue gases, superheated and secondary steam, heat from domestic and industrial wastewater, and the energy of excess pressure in gas distribution systems. Special attention is given to technologies of cogeneration, heat recovery, and the application of the heat pumps and exchangers across various industrial sectors. It is shown that flue gases offer high potential for thermal reuse due to their elevated temperatures and prevalence in heat-intensive operations. At the same time, limitations such as uneven heating and high transport costs are noted. The study discusses the advantages and shortcomings of secondary steam in processes like evaporation, distillation, drying, heating, and electricity generation. It further explores the integration potential in sewage systems, highlighting how thermal recovery at component, building, network and treatment plant levels can reduce environmental impact and reclaim energy losses. However, challenges such as heat exchanger fouling present significant barriers to implementation. The article also addresses energy losses due to pressure reduction in gas pipelines, underlining the potential of turboexpander technologies. The analysis concludes that thermal energy integration plays a strategic role in reducing resource intensity and enhancing the sustainability of industrial systems. Among the evaluated solutions, the recovery of flue gas heat emerges as the most promising due to its efficiency and technological feasibility, although other approaches may be more appropriate depending on industry-specific conditions. The practical value of the study lies in providing a theoretical basis for the implementation of energy-saving measures in industry through a systematized approach to thermal flow integration.

Keywords: heat-and-power integration, environmental management, energy, resources, chemical industry, optimization.

Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор,
А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,
К. В. Перемот

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: сонячна система, теплоенергетична установка, сонячна енергія, сонячні колектори, гаряче водопостачання, вимірювання теплової енергії, діагностика і надійність роботи установки, діагностика роботи енергетичного обладнання, опалення будинків, екологічна обстановка регіону, навколишнє середовище, довкілля, низькопотенційна енергія, полімерні матеріали, вартість однієї контурної сонячної системи, вітчизняні матеріали, закордонні матеріали, економічні показники, технологічний процес, основні параметри процесу, котли-дублери, органічне паливо, зарплата, автоматизація технологічного процесу.

Постановка задачі. Використовуючи високоякісні установки для перероблення сонячного випромінювання у тепло, кожен має можливість покрити до 70 % щорічної потреби в гарячій воді. Для приватних будинків в літній період можлива повна відмова від котельні та перехід до екологічного обладнання. На ринку сонячних колекторів ви знайдете такі види:

1. Безскляна низькотемпературна установка. Зазвичай їх використовують для підігріву води у басейнах. Панелі добре справляються з нагріванням води у великих об'ємах і з низьким температурним режимом. Такий тип не має великого попиту, адже він втрачає свою ефективність навіть при +20 °С.

2. Параболічна (концентрична) сонячна конструкція. Це ідеальний варіант для тих, кому потрібно нагріти воду вище 100 °С. Вони мало поширені через свої розміри, принцип дії та популярність у використанні. Підприємства, які використовують парову систему, зазвичай роблять індивідуальне замовлення відносно потреб та побажань клієнта.

3. Плоский колектор: 1. Найпоширеніший тип, який має невисоку вартість і популярність серед населення. Вони відрізняються між собою розмірами, форматами сторін, вагою та естетичним зовнішнім виглядом. Вся конструкція складається з теплоізованого короба, поверхні для поглинання випромінювання Сонця та мідних труб. Враховуючи особливості установки, їх рекомендують для сезонного використання через відсутність теплоізоляції верхньої лицьової сторони, яка виготовляється із скла [1].

Розглянемо систему з примусовою циркуляцією теплоносія, яка представлена на рис. 1.

У системах з примусовою циркуляцією в контур колекторного кола включається циркуляційний насос 3, який подає теплоносій в нижню частину колектора 1. Роботою насоса управляє спеціальний контролер. Під дією сонячних променів зовнішня поверхня колектора, яка має матовий чорний колір, нагрівається, і таким чином нагріває теплоносій, який знаходиться в колекторі. Напір циркуляційного насоса налаштований таким чином, що теплоносій піднімаючись доверху колектора має максимальну температуру теплоносія і направляється в бак-акумулятор 2.

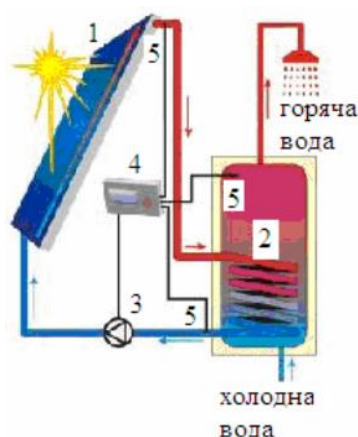


Рисунок 1 – Система з примусовою циркуляцією теплоносія:
1 – колектор; 2 – бак-аккумулятор (бак-бойлер); 3 – циркуляційний насос;
4 – контролер (блок управління); 5 – датчики температури

2. Одноконтурна сонячна система складається з плоскокапілярних тонкоплівкових гнучких полімерних колекторів безнапірного типу спеціальної конструкції [2], в яких теплоносій рухається зверху вниз під дією сили тяжіння за похилою поверхнею у вигляді плівки рідини [3].

Схема плоскокапілярного тонкоплівкового гнучкого полімерного колектора безнапірного типу спеціальної конструкції, розташованого в прямокутному корпусі наведена на рис. 2.

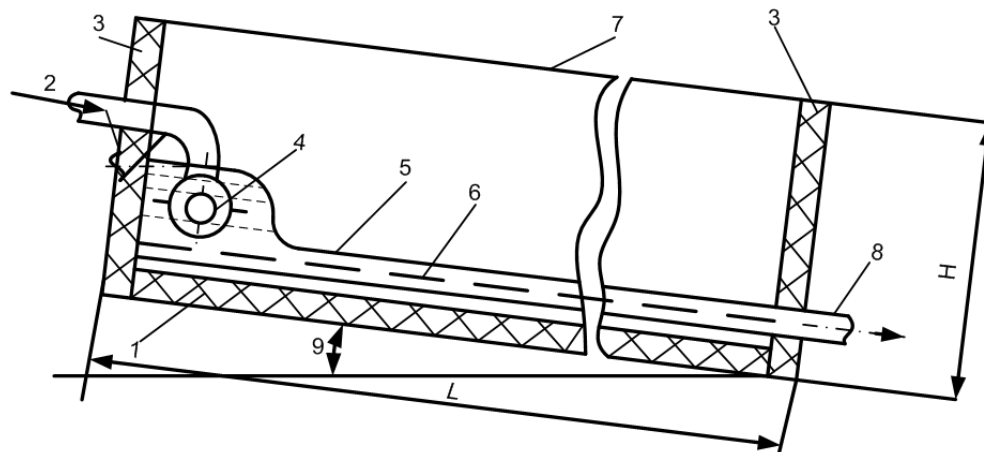


Рисунок 2 – Плоский сонячний колектор:
1 – основа корпусу; 2 – подача холодної води; 3 – бічні стінки корпусу; 4 – розподільна труба з отворами; 5 – гнучкий полімерний колектор; 6 – листовий матеріал із осередками; 7 – прозора огорожа-скло;
8 – зливна труба (вихід гарячої води); 9 – кут нахилу корпусу у градусах

Застосування тонкоплівкових сонячних колекторів безнапірного типу з полімерної плівки дозволяє зменшити ризик втрати теплоносія за рахунок розриву сонячного колектора від надлишкового тиску, як показано на рис. 1. За ефективністю нагрівання теплоносія на вході в колектор і на його виході, сонячний колектор з полімерної плівки поглинає більше сонячного випромінювання ніж відомі колектори з металу, тим самим забезпечує нагрівання теплоносія до більш високої температури (90 °C), ніж колектор виготовлений з металу (63 °C) [4, 5]. Продуктивність одноконтурної сонячної системи в

теплоенергетичній установці визначається кількістю гарячої води, необхідної для однієї людини плюс кількість гарячої води, необхідної для потреб приміщень різного призначення.

Принцип роботи сонячної системи є наступним. Набір плоских сонячних колекторів розташований на даху будівлі, що знаходиться на відкритому майданчику, де потоки сонячного випромінювання можуть вільно падати на поверхні колекторів таким чином, щоб сонячна інсоляція на поверхні колекторів була весь проміжок між 6 і 20 годинами. Колектори повинні бути спрямовані на південь. Таке розташування колекторів має бути для отримання максимального теплового потоку сонячного випромінювання, якщо у одноконтурній системі немає спеціальних пристроїв, які можуть стежити за пересуванням Сонця. Вся конструкція з набору колекторів встановлюється на даху будівлі під кутом 12–15 градусів до горизонту.

Вода з артезіанської свердловини циркуляційним насосом подається в трубопровод 2 (див. рис. 2) і потрапляє у розподільчу трубу з отворами за всією шириною труби 4 [6]. Труба 4 розташовується в поліетиленовій панчосі шириною 1,5 м. Вода розтікається за всією шириною панчохи і самопливом рухається зверху вниз під дією сили тяжіння за похилою поверхнею корпусу колектора у вигляді плівки рідини. Оскільки товщина плівки рідини від 5 мм до 10 мм, то плівка нагрівається швидко до високої температури (90 °C). Далі гаряча вода збирається в баках акумуляторів та подається циркуляційним насосом на необхідні потреби.

4. Трубчато-вакуумний колектор. Даний вид має унікальну конструкцію, де адсорбер поглинає сонячні промені та передає потік тепла мідними трубками. Їх використання можливе навіть взимку, завдяки відокремленню поверхні від зовнішнього повітря вакуумом [7].

Також для таких приладів характерна стійкість до механічних ушкоджень, універсальність та невибагливість. Споживач має змогу обрати для себе будь-яку бюджетну модель для застосування в класичних системах, що працюють під тиском. Кожен з вище перерахованих варіантів ідеально доповнить дизайн вашої оселі та забезпечить екологічною енергією будинок у теплу пору року та міжсезоння.

Переваги сонячних систем: сонячна енергія безкоштовна; тривалий термін експлуатації – 25 років; автономність (для літніх сонячних систем без використання електроенергії); низька собівартість отриманої теплової енергії; використовується екологічно чиста невичерпна енергія Сонця [8].

Таким чином застосування одноконтурної сонячної системи замість водогрійних котлів, працюючих на органічному паливі (природний газ, мазут, вугілля, деревні відходи і тощо) для отримання теплової низькопотенційної енергії, яка використовується для гарячого водопостачання та опалення об'єктів різного призначення, а також покращення екологічної обстановки регіону, в якому використовуються сонячні установки, є актуальними завданнями.

Мета статті. Зробити фінансову оцінку передбачуваних витрат і одержуваного результату, оцінку прибутковості проекту, і економічної доцільності розробки і впровадження одноконтурної сонячної системи в теплоенергетичній установці, а також порівняльну оцінку вартості одноконтурної сонячної системи із вітчизняних матеріалів з вартістю системи із закордонних матеріалів.

Для точної оцінки економічної ефективності потрібно ретельно розглянути усі статті витрат і усі можливі економічні ефекти. Ці показники пов'язані із специфікою технологічного процесу [9].

Після модернізації конструкції одноконтурної сонячної установки для гарячого водопостачання і опалення приміщення та впровадження нової системи автоматизації, економічний ефект може бути досягнутий за рахунок відмови від органічного палива як енергоносія, так як у модернізованій схемі в якості дублера починає використовуватися електронагрівник. У свою чергу система автоматизації забезпечує контроль та регулювання основних параметрів процесу та дозволяє подовжити термін роботи устаткування та зменшити витрати на ремонт [10].

Виходячи із вище наведеного, економічний ефект можна отримати за рахунок:

- відмови від органічного палива як енергоносія;
- зменшення витрат на ремонт 10 %.

Розрахунок витрат на проектування

Зарплата розроблювачів визначається виходячи з кількості виконавців, що діють посадових окладів і кількості місяців участі в розробці. Розрахунок зарплати приводиться за [11] та представлений в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розрахунок заробітної плати розроблювачів

Посада виконавця	Оклад, грн/міс	Кількість, чол	Кількість, міс	Сумма з/п, грн
Старший науковий співробітник	10000	1	2	20000
Інженер	8000	1	3	24000
Всього, Σ				44000

Розрахунок витрат на розробку проекту зроблений за «трудовим» методом [12] і представлений у кошторисі витрат (див. табл. 2).

Таблиця 2 – Кошторис витрат на проектування

№	Найменування статей витрат	Сума, грн.	Обґрунтування
1	Зарплата розроблювачів	44000	з розрахунку
2	Відрахування на соціальні потреби	9680	22% від ст. 1
3	Разом прямих витрат	53680	Сума ст. 1 – 2
4	Накладні витрати	18788	35% від ст. 3
5	Планові накопичення	18117	25% від суми ст. 3, 4
6	Разом за кошторисом витрат	90585	Сума ст. 3 - 5
7	ПДВ	18117	20% від ст. 6
8	Разом витрати на проектування	108702	Сума ст. 6, 7

Розрахунок капітальних витрат підприємства

Склад капітальних витрат підприємства:

- витрати на проведення науково-дослідних і проектно-конструкторських робіт (витрати на розробку проекту);
- вартість придбання, доставки, монтажу, налагодження приладів і засобів автоматизації.

$$K=Z_{об} + Z_{п} .$$

Вартість приладів і засобів автоматизації розраховують за специфікацією основного устаткування (див. табл. 3).

Таблиця 3 – Специфікація основного устаткування

Тип прибору	Ціна, грн	Кількість, шт.	Сума, грн
Інтеграф-1100-07-04-1-С4-М0	7500	1	7500
Реле протоку РП	700	1	700
Сонячний колектор	25000	21	25000
Насос	6000	8	48000
Термоперетворювач ДТС.І025	400	1	400
Бак ємністю 4 т.	15000	4	60000
Модуль вводу ОВЕН МВА8	8500	1	8500
Контролер ОВЕН ПЛК 154	8000	1	8000
Установка хімводоочищення	7500	1	7500
Лічильник води ЕТК (W) – 80	600	2	1200
Разом за основним обладнанням – $C_{осн}$			166800

Вартість неврахованого у специфікації допоміжного обладнання – $C_{доп}$, грн, визначають у відсотках (8–10 %) від вартості основного обладнання $C_{осн}$, грн:

$$C_{доп} = 166800 \cdot 0,08 = 13344 .$$

Загальна вартість обладнання проекту – $C_{об}$, грн:

$$C_{об} = C_{осн} + C_{доп} = 166800 + 13344 = 180144 .$$

Загальні витрати на обладнання визначаються у відсотках $\Pi_{тм} = (15–20 \%)$ від загальної вартості обладнання, $Z_{об}$, грн:

$$Z_{об} = C_{об} \cdot \left(1 + \frac{\Pi_{тм}}{100}\right) = 180144 \cdot \left(1 + \frac{15}{100}\right) = 207165,6 ,$$

де $\Pi_{тм} = (15–20 \%)$ – процент видатків на транспортування, монтаж та наладку обладнання.

Загальна сума капітальних витрат підприємства становить, K , грн:

$$K=Z_{об} + Z_{п} = 207165,6 + 44000 = 251165,6 .$$

Розрахунок річних експлуатаційних витрат

1. Матеріальні витрати Z_m , грн, – витрати на електроенергію і допоміжні матеріали – 8 % від загальної вартості обладнання – $C_{об}$.

$$Z_m = C_{об} \cdot 0,08 = 180144 \cdot 0,08 = 14411,52.$$

2. Амортизація Z_a – 15 % , грн, від суми капітальних витрат підприємства K :

$$Z_a = K \cdot 0,15 = 251165,6 \cdot 0,15 = 37674,84.$$

3. Витрати на поточний ремонт Z_p – 10 % , грн, від загальної вартості обладнання $C_{об}$:

$$Z_p = C_{об} \cdot 0,1 = 180144 \cdot 0,1 = 18014,4.$$

4. Інші витрати $Z_{ін}$ – 5 % , грн, від витрат на обладнання $Z_{об}$:

$$Z_{ін} = Z_{об} \cdot 0,05 = 207165,6 \cdot 0,05 = 10358,28.$$

Загальна сума річних витрат за експлуатацію нової техніки, $Z_{експ}$, грн:

$$Z_{експ} = Z_m + Z_a + Z_p + Z_{ін} = 14411,52 + 37674,84 + 18014,4 + 10358,28 = 80459,04.$$

Розрахунок річної економії підприємства

Економія при зниженні прямих витрат.

Режимний фонд часу установки, год/рік:

$$T_{реж} = D_p \cdot N_{зм} \cdot T_{зм} = 153 \cdot 1 \cdot 24 = 3672,$$

де D_p – кількість робочих днів за рік - п'ять місяців – 153 доби; $N_{зм}$ – кількість змін за добу – 1; $T_{зм}$ – тривалість зміни – 24 години.

Плановий фонд робочого часу $T_{пл}$, год/рік, визначається з урахуванням часу планових простоїв технологічного обладнання в технічному обслуговуванні та ремонтах:

$$T_{пл} = T_{реж} \cdot \left(1 - \frac{\Pi_{пр}}{100}\right) = 3672 \cdot \left(1 - \frac{15}{100}\right) = 3121,2,$$

де $T_{пр}$ – час планових простоїв; $\Pi_{пр} = 15\%$ – процент планових простоїв обладнання.

Зробимо розрахунок економії коштів після відмови від органічного палива [13–15].

Для розрахунку економії коштів після відмови від природного газу як енергоно-

сія, спочатку визначимо витрати, грн, до модернізації установки, при наявності котла-дублера:

$$S_{\Gamma} = P_{\text{час}}^H \cdot K_{\text{ВД}} \cdot T_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\Gamma},$$

де $P_{\text{час}}^H$ – погодинна витрата природного газу для котлів типу КВГ, м³/год; $K_{\text{ВД}}$ – коефіцієнт використання котла-дублера ($K_{\text{ВД}} = 0,4$); Π_{Γ} – ціна природного газу для населення ($\Pi_{\Gamma} = 7,96$ грн/м³).

$$S_{\Gamma} = P_{\text{час}}^H \cdot K_{\text{ВД}} \cdot T_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\Gamma} = 90 \cdot 0,4 \cdot 3121,2 \cdot 7,96 = 894411,07.$$

Тепер визначимо витрати, грн, після модернізації установки при застосуванні в якості дублера – електронагрівника:

$$S_{\text{ЕЛ}} = W \cdot K_{\text{ВЕН}} \cdot T_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\text{ЕЛ}},$$

де W – номінальна потужність електронагрівника – 20 кВт; $K_{\text{ВЕН}}$ – коефіцієнт використання електронагрівника ($K_{\text{ВЕН}} = 0,4$); $\Pi_{\text{ЕЛ}}$ – ціна на електроенергію для населення ($\Pi_{\text{ЕЛ}} = 4,62$ грн/кВт·ч).

$$S_{\text{ЕЛ}} = W \cdot K_{\text{ВЕН}} \cdot T_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\text{ЕЛ}} = 20 \cdot 0,4 \cdot 3121,2 \cdot 4,62 = 115359,52.$$

Таким чином, економія, грн, після відмови від природного газу як енергоносія складе:

$$\Delta S_{\text{ЕЛ}} = S_{\Gamma} - S_{\text{ЕЛ}} = 894411,07 - 115359,52 = 779051,5$$

Економія при зниженні непрямих витрат.

При впровадженні системи автоматизації технологічного процесу за рахунок підтримки параметрів виробництва на оптимальному рівні знижується знос устаткування і зменшуються витрати на проведення ремонтів.

Річні витрати на ремонт, грн:

$S_{\text{рем ст}} = 12$ тис. грн.

$\Pi_{\text{рем}}$ – відсоток зниження річних витрат на ремонти ($\Pi_{\text{рем}} = 10\%$).

$$S_{\text{рем.н}} = S_{\text{рем.ст}} \cdot \left(1 - \frac{\Pi_{\text{рем}}}{100}\right).$$

$$S_{\text{рем н}} = 12000 \cdot \left(1 - \frac{10}{100}\right) = 10800.$$

Річна економія за рахунок зниження витрат на ремонт, грн:

$$\Delta S_{\text{рем}} = S_{\text{рем ст}} - S_{\text{рем н}} = 12000 - 10800 = 1200.$$

Фінансові результати впровадження системи

Загальна річна економія розраховується як сумарна економія за всіма факторами:

$$\Delta S = \Delta S_{\text{РЕМ}} + \Delta S_{\text{ЕЛ}},$$

$$\Delta S = \Delta S_{\text{РЕМ}} + \Delta S_{\text{ЕЛ}} = 1200 + 779051,5 = 780251,5.$$

Основний фінансовий результат визначається річним приростом балансового прибутку підприємства, грн/рік:

$$\Delta \Pi_{\text{рб}} = \Delta S - Z_{\text{ЕКС}} = 780251,5 - 80459,04 = 699792,46.$$

Балансовий прибуток обкладається податком на прибуток (25 %). Річний приріст чистого прибутку, грн/рік:

$$\Delta \Pi_{\text{рч}} = \Delta \Pi_{\text{рб}} \cdot \left(1 - \frac{H_{\text{П}}}{100}\right) = 699792,46 \cdot \left(1 - \frac{25}{100}\right) = 524844,35.$$

Строк окупності капітальних витрат, роки:

$$T_{\text{ок}} = \frac{K}{\Delta \Pi_{\text{рч}}}.$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{251165,6}{524844,35} = 0,48.$$

Коефіцієнт ефективності інвестицій $E = 2,4$. Результати техніко-економічного обґрунтування даної статті зведені в таблиці 4.

Отримані значення техніко-економічних показників говорять про те, що впровадження даної системи автоматизації технологічного процесу економічно доцільно.

Зробимо розрахунок економії коштів після відмови від мазуту як енергоносія (марка мазуту М – 100), який використовується в котлах-дублерах. Спочатку визначимо витрати, грн, до модернізації установки, при наявності котла-дублера, працюючого на мазуті:

Річна витрата енергоносія до модернізації, грн:

$$P_{\text{річ}} = P_{\text{год}} \cdot T_{\text{пл}} = 3,5 \cdot 3121,2 = 10924,2.$$

Витрати підприємства на енергоносії до модернізації, грн:

$$S_{\text{М}} = P_{\text{річ}} \cdot C_{\text{е}} = 10924,2 \cdot 10203 = 111459612,6,$$

де $C_{\text{е}} = 17900$ грн/т ціна за одиницю енергоносія (мазут). А було застосовано 0,57 т мазуту за п'ять місяців роботи системи – $C_{\text{е}} = 10203$ грн.

Тепер визначимо витрати, грн, після модернізації установки при застосуванні в якості дублера – електронагрівника, були визначені нами раніше :

$$S_{\text{ЕЛ}} = W \cdot K_{\text{ВЕН}} \cdot T_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\text{ЕЛ}},$$

де W – номінальна потужність електронагрівника, 20 кВт; $K_{\text{ВЕН}}$ – коефіцієнт використання електронагрівника ($K_{\text{ВЕН}} = 0,4$); $\Pi_{\text{ЕЛ}}$ – ціна на електроенергію для населення – ($\Pi_{\text{ЕЛ}} = 4,62$ грн/кВт·ч).

$$S_{\text{ЕЛ}} = W \cdot K_{\text{ВЕН}} \cdot T_{\text{пл}} \cdot \Pi_{\text{ЕЛ}} = 20 \cdot 0,4 \cdot 3121,2 \cdot 4,62 = 115359,52.$$

Таким чином, економія, грн, після відмови від мазуту як енергоносія складе:

$$\Delta S_{\text{М}} = S_{\text{М}} - S_{\text{ЕЛ}} = 111459612,6 - 115359,52 = 111344253,1.$$

Далі зробимо розрахунок зменшення шкідливих викидів в довкілля від використання мазуту.

Розрахунок зменшення шкідливих викидів за рахунок економії палива проводять за формулою:

$$M_i = c_i \cdot B,$$

де c_i – питомі викиди компонентів (див. табл. 5)

Таблиця 4 – Основні техніко-економічні показники

№ п/п	Найменування	Значення
1	Загальні витрати на обладнання, грн	166800
2	Витрати на проектування, грн	108702
3	Загальна сума капітальних витрат, грн	251165,6
4	Річні експлуатаційні витрати, грн	80459,04
5	Загальна річна економія:	894411,07
6	- на енергоносіях, грн	115359,52
7	- на ремонтах, грн	1200
8	Річний балансовий прибуток, грн	699792,46
9	Річний чистий прибуток, грн	524844,35
10	Коефіцієнт ефективності інвестицій	2,4
11	Строк окупності капітальних витрат, років	0,48

Розрахунок зменшення шкідливих викидів в довкілля після відмови від природного газу наведений в [16].

Порівняльну оцінку вартості одноконтурної сонячної системи, виготовленої із вітчизняних матеріалів, з вартістю системи, виготовленої із закордонних матеріалів, ми зробили наступним чином. Вартість одноконтурної сонячної системи виробництва Китаю – 49500 грн. за два м² колектора. Таким чином один м² колектора має вартість 24750 грн. Представлена нами одноконтурна сонячна система має 210 м² колекторів. Вартість колекторів китайського виробництва буде, грн:

$$S_K = 210 \cdot 24750 = 5197500 .$$

А вартість вітчизняних колекторів з українських матеріалів (21 колекторів площею 10 м² кожний), згідно табл.3 даної статті, коштує 25000 грн.

Таким чином економія коштів, грн.:

$$\Delta S_K = S_K - S_{UA} = 5197500 - 25000 = 5172500$$

Таблиця 5 – Питомі викиди шкідливих продуктів згоряння при факельному спалюванні органічного палива в енергетичних котлах [17]

Викиди M_i	Мазут, г/0,57т
Валовий викид речовин у вигляді суспендованих твердих частинок (сажа)	8,95
Валовий викид оксиду азоту (у перерахунку на діоксид азоту) NO_x	1,4
Валовий викид азоту оксиду N_2O	0,012
Валовий викид сірки діоксиду SO_2	11,04
Валовий викид неметанових легких органічних речовин (НМЛОС)	0,24
Валовий викид оксиду вуглецю CO	7,03
Валовий викид метану CH_4	0,064
Валовий викид діоксиду вуглецю CO_2	1,695
$\sum M_i$	30,43

Висновки. Після модернізації конструкції одноконтурної сонячної установки для гарячого водопостачання і опалення приміщення та впровадження нової системи автоматизації, економічний ефект був досягнутий за рахунок відмови від природного газу та мазуту як енергоносіїв, так як у модернізованій схемі в якості дублера був задіяний електронагрівник. У свою чергу система автоматизації забезпечила контроль та регулювання основних параметрів процесу та дозволила продовжити термін роботи устаткування та зменшити витрати на ремонт. У даному проекті строк окупності склав 0,48 року, що на сьогоднішній день можна вважати відмінним результатом. Застосування одноконтурної сонячної системи в теплоенергетичній установці показало, що економія 600 літрів мазуту з усіх 210 м² колектора складе – 111344253,1 грн за п'ять місяців сезонного використання. Розрахунок зменшення шкідливих викидів в довкілля після відмови від використання мазуту, більш ніж на 30 г шкідливих речовин у навко-

лишнє середовище запобіг забрудненню навколишнього середовища. Зробивши порівняльну оцінку вартості одноконтурної сонячної системи з українських матеріалів та вартості колекторів китайського виробництва – маємо економію коштів – 5172500 грн.

Розрахунок економії коштів після відмови від природного газу як енергоносія, дав економію – 779051,5 грн.

Застосування одноконтурної сонячної системи у теплоенергетичній установці дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, заощаджувати органічне паливо; виробляти теплову енергію; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища.

Отримані значення техніко-економічних показників говорять про те, що розробка й впровадження даного проекту економічно вигідна і доцільна.

Література

1. Мельник Л. Г., Маденко О. І., Терещенко С. В. Наукове обґрунтування підвищення техніко-економічної ефективності використання сонячної енергії. *Механізм регулювання економіки*. 2020. № 2 (88). С. 121–130.
2. Селихов Ю. А., Селихова Л. Ю., Селихова Н. В. Двоконтурна геліоводонагрівна установка. Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.
3. Yurii A. Selikhov, Victor A. Kotsarenko, Jiří J. Klemeš, Petro O. Kapustenko. The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit. *Chemical Engineering Transactions*. 2018. Vol. 70. P. 2053-2058.
4. Селихов Ю. А., Селихова Л. Ю. Полімерна композиція, Патент України, № 72078 А, Бюл. № 10, 2004.
5. Селихов Ю. А., Коцаренко В. О. Оценка эффективности теплоэнергетических показателей систем солнечного горячего водоснабжения. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2005. № 14. С. 37–41.
6. Селихов Ю. А. Геліоводонагрівник. Патент України, № 75178, Бюл. № 3, 2006.
7. Лисенко Л. І., Махотіло К. В., Косатий Д. М. Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в Харківській області. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2013. № 59 (1032). С. 101–111.
8. Возняк О. Т., Янів М. Є. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Львів, 2010. № 664. С. 7–10.
9. Економіка підприємства : підручник / заг. ред.: Ковальської Л. Л., Крив'язюка І. В. Київ : Кондор, 2020. 700 с.
10. Тошинский В. І., Подустов М. А., Литвиненко І. І. та ін., Михайлов В. С., Молчанов В. І., Бабіченко А. К., Печенко Т. І., Красніков І. Л. Проектування систем автоматизації технологічних процесів : навч. посіб. Харків : НТУ «ХПИ», 2006. 412 с.
11. Лойко В. В., Макаровська Т. П. Економіка підприємства : навч. посіб. Київ : КНУТД, 2015. 267 с.
12. Бойчик І. М. Економіка підприємства : підручник. Київ : Кондор, 2016. 378 с.
13. Солімчук А. Е. Порівняльна оцінка викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря при спалюванні різних видів палива. *Студентський вісник національного*

університету водного господарства та природокористування. 2019. Вип. 1 (11). С. 65–68.

14. Радченко А. М., Макарова О. В. Зменшення антропогенного навантаження газових котельних підприємств автоклавного виробництва будівельних матеріалів. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв : НУК, 2012. № 5–6 (445). С. 87–92.

15. Лисак О. І., Андрєєва Л. О., Болтянська Л. О. Економіка підприємства : навч. посіб. Мелітополь : Люкс, 2020. 272 с.

16. Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Нагорний Е. Р. та ін. Пільник І. В., Рись В. Г. Моделювання процесу енергетичної ефективності роботи теплоенергетичної установки на базі сонячних колекторів з використанням програмування у прикладному середовищі MATHCAD. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2025. № 1. С. 12–24.

17. Паливно-енергетичні ресурси України : статистичний збірник / Державний комітет статистики України. Київ, 2001. 273 с.

Bibliography (transliterated)

1. Melnyk L. H., Matsenko O. I., Tereshchenko S. V. (2020). Naukove obgruntuvannya pidvyshchennia tekhniko-ekonomichnoi efektyvnosti vykorystannia soniachnoi enerhii. *Mekhanizm rehuliuвання ekonomiky*, 2(88), 121–130.

2. Selykhov Yu. A., Selykhova L. Yu., Selykhova N. V. Dvokonturna heliovodonahrivna ustanovka. Patent Ukrainy, № 64198 A, Biul. № 2, 2004.

3. Yurii A. Selikhov, Victor A. Kotsarenko, Jiří J. Klemeš, Petro O. Kapustenko (2018). The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit. *Chemical Engineering Transactions*, 70, 2053-2058.

4. Selykhov Yu. A., Selykhova L. Yu. Polimerna kompozytsiia, Patent Ukrainy, № 72078 A, Biul. № 10, 2004.

5. Selikhov Yu.A., Kotsarenko V.O. (2005). Otsenka effektivnosti teploenergeticheskikh pokazateley sistem solnechnogo goryachego vodosnabzheniya. *Vestnik NTU "KhPI"*, 14, 37–41.

6. Selykhov Yu. A. Heliovodonahrivnyk. Patent Ukrainy, № 75178, Biul. № 3, 2006.

7. Lysenko L. I., Makhotilo K. V., Kosaty D. M. (2013). Faktory vplyvu na efektyvnist so-niachnykh kolektoriv ta fotoelektrychnykh panelei v Kharkivskii oblasti. *Visnyk NTU «KhPI»*. 59 (1032), 101–111.

8. Vozniak O. T., Yaniv M. Ye. (2010). Enerhetychnyi potentsial soniachnoi enerhetyky ta perspektyvy yoho vykorystannia v Ukraini. *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika»*. 664, 7–10.

9. *Ekonomika pidpriemstva : pidruchnyk* (2020). Kovalskoi L. L., Kryviaziuka I. V. (Ed.). Kyiv: Kondor. 700 p.

10. Toshinskiy V. I., Podustov M. A., Litvinenko I. I, Mihaylov V. S., Molchanov V. I., Babichenko A. K., ... Krasnikov I. L. (2006). *Proektuvannya system avtomatyzatsii tekhnolohichnykh protsesiv: navch. posib*. Kharkiv: NTU «KhPI». 412 p.

11. Loiko V. V., Makarovska T. P. (2015). *Ekonomika pidpriemstva: navch. posib*. Kyiv: KNUTD. 267 p.

12. Boychik I. M. (2016). *Ekonomika pIdpriEmstva: pIdruchnik*. Kyiv: Kondor. 378 p.
13. Solimchuk A. E. (2019). Porivnialna otsinka vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povi-tria pry spaliuvanni riznykh vydiv palyva. *Studentskyi visnyk natsional-noho univer-sytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*, 1(11), 65–68.
14. Radchenko A. M., Makarova O. V. (2012). Zmenshennia antropohennoho navantazhennia hazovykh kotelnykh pidpriemstv avtoklavnoho vyrobnytstva budivelnnykh materialiv. *Zbirnyk nau-kovykh prats NUK*, 5–6 (445), 87–92.
15. Lysak O. I., Andrieieva L. O., Boltianska L. O. (2020). *Ekonomika pidpriemstva : navch. posib*. Melitopol: Liuks. 272 p.
16. Selikhov Yu. A., Gorbunov K. O., Nagornyi E. R., Pilnyk I. V., Rys V. H. (2025). Modeliuvannia protsesu enerhetychnoi efektyvnosti roboty teploenerhetychnoi ustanovky na bazi soniachnykh kolektoriv z vykorystanniam prohramuvannia u prykladnomu seredovyshchi MATHCAD. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozbezrehennia*, 1, 12–24.
17. Palyvno-enerhetychni resursy Ukrainy: statystychnyi zbirnyk. (2001). Derzhavnyi komitet statystyky Ukrainy. Kyiv, 2001. 273 p.

УДК 662.997

Ю. А. Селихов, К. О. Горбунов, А. М. Миронов, М. В. Ильченко, К. В. Перемот

РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

Теплові електростанції (ТЕС) виробляють 60–80 % електроенергії в нашій країні. Вони працюють на твердому (вугілля), рідкому (мазут) або газоподібному (природний газ) паливі. ТЕС викидають у атмосферу коло 30 % загального обсягу всіх шкідливих промислових відходів. Вони істотно впливають на навколишнє середовище району їх розташування і на стан біосфери загалом. Тим часом, кожен з існуючих широко використовуваних типів енергоустановок спричиняє цілу низку різноманітних негативних впливів на навколишнє середовище.

Великомасштабне виробництво теплової енергії на сонячних електростанціях пов'язане з низькою густиною інсоляції (в середньому 1 кВт на 1 м²). Тому необхідна велика площа поверхні енергоприймачів – сонячних колекторів. Через значну вартість одиниці поверхні сонячних колекторів закордонного виробництва створення потужних сонячних електростанцій вимагає великих затрат. Виробництво сонячних колекторів з вітчизняних матеріалів буде значно дешевшим.

У цій статті представляємо фінансову оцінку передбачуваних витрат і одержуваного результату, оцінку прибутковості проекту, і економічної доцільності розробки і впровадження одноконтурної сонячної системи в теплоенергетичній установці, а також порівняльну оцінку вартості одноконтурної сонячної системи із вітчизняних матеріалів з вартістю системи із закордонних матеріалів.

Після модернізації конструкції одноконтурної сонячної установки для гарячого водопостачання і опалення приміщення та впровадження нової системи автоматизації, економічний ефект був досягнутий за рахунок відмови від природного газу та мазуту як

енергоносіїв, так як у модернізованій схемі в якості дублера був задіяний електронагрівник. У свою чергу система автоматизації забезпечила контроль та регулювання основних параметрів процесу та дозволила продовжити термін роботи устаткування та зменшити витрати на ремонт. У даному проекті строк окупності склав 0,48 року, що на сьогоднішній день можна вважати відмінним результатом. Застосування одноконтурної сонячної системи в теплоенергетичній установці показало, що економія 600 літрів мазуту з усіх 210 м² колектора складе – 111344253,1 грн за п'ять місяців сезонного використання. Розрахунок зменшення шкідливих викидів в довкілля після відмови від використання мазуту, більш ніж на 30 г шкідливих речовин у навколишнє середовище запобіг забрудненню навколишнього середовища. Зробивши порівняльну оцінку вартості одноконтурної сонячної системи з українських матеріалів та вартості колекторів китайського виробництва – маємо економію коштів – 5172500 грн.

Розрахунок економії коштів після відмови від природного газу як енергоносія, дав економію – 779051,5 грн.

Застосування одноконтурної сонячної системи у теплоенергетичній установці дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, заощаджувати органічне паливо; виробляти теплову енергію; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища.

Отримані значення техніко-економічних показників говорять про те, що розробка й впровадження даного проекту економічно вигідна і доцільна.

Ключові слова: сонячна система, теплоенергетична установка, сонячна енергія, сонячні колектори, гаряче водопостачання, вимірювання теплової енергії, діагностика і надійність роботи установки, діагностика роботи енергетичного обладнання, опалення будинків, екологічна обстановка регіону, навколишнє середовище, довкілля, низькопотенційна енергія, полімерні матеріали, вартість одноконтурної сонячної системи, вітчизняні матеріали, закордонні матеріали, економічні показники, технологічний процес, основні параметри процесу, котли-дублери, органічне паливо, зарплата, автоматизація технологічного процесу.

Yu. A. Selikhov, K. A. Gorbunov, A. N. Mironov, M. V. Ilchenko, K. V. Peremot

CALCULATION OF RELIABILITY OF USING SOLAR COLLECTORS

Thermal power plants (TPP) produce 60–80 % of electricity in our country. They run on solid (coal), liquid (fuel oil) or gaseous (natural gas) fuel. Thermal power plants emit about 30% of the total volume of all harmful industrial waste into the atmosphere. They have a significant impact on the environment of the area where they are located and on the state of the biosphere as a whole. Meanwhile, each of the existing widely used types of power plants has a whole range of different negative impacts on the environment.

Large-scale production of thermal energy in solar power plants is associated with low insolation density (on average 1 kW per 1 m²). Therefore, a large surface area of energy receivers – solar collectors – is required. Due to the significant cost per unit surface area of foreign-made solar collectors, the creation of powerful solar power plants requires large expenditures. The production of solar collectors from domestic materials will be significantly cheaper.

er.

In this article we present a financial assessment of the expected costs and the obtained result, an assessment of the profitability of the project and the economic feasibility of the development and implementation of a single-circuit solar system in a thermal power plant, as well as a comparative assessment of the cost of a single-circuit solar system made of domestic materials with the cost of a system made of foreign materials.

After upgrading the design of a single-circuit solar installation for hot water supply and space heating and introducing a new automation system, an economic effect was achieved by refusing natural gas and fuel oil as energy sources, since an electric heater was used as a backup in the modernized scheme.

In turn, the automation system ensured control and regulation of the main process parameters and made it possible to extend the service life of the equipment and reduce repair costs. In this project, the payback period was 0.48 years, which can be considered an excellent result today. The use of a single-circuit solar system in a thermal power plant showed that savings of 600 liters of fuel oil out of a total of 210 m² collector will amount to 111344253.1 UAH for five months of seasonal income.

Calculation of the reduction of harmful emissions into the environment after refusing to use fuel oil by more than 30 g of harmful substances into the environment prevented environmental pollution.

Having made a comparative assessment of the cost of a single-circuit solar system made of Ukrainian materials and the cost of Chinese-made collectors, we have a savings of 5,172,500 UAH.

Calculation of savings after refusing natural gas as an energy source yielded savings of 779,051.5 UAH.

The use of a single-circuit solar system in a thermal power plant allows: to reduce the cost of thermal energy by reducing material consumption and equipment costs, to save organic fuel; to produce thermal energy; to reduce the thermal load and environmental pollution.

The obtained values of technical and economic indicators indicate that the development and implementation of this project is economically beneficial and expedient.

Keywords: single-circuit solar system, thermal power plant, solar energy, solar collectors, hot water supply, measurements of thermal energy, diagnostics and reliability of the plant, diagnostics of power equipment, heating of buildings, ecological situation of the region, environment, low-potential energy, polymeric materials, cost of a single-circuit solar system, domestic materials, foreign materials, economic indicators, technological process, main process parameters, backup boilers, organic fuel, wages, automation of the technological process.

А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент,
О. О. Гапонова, канд. техн. наук, доцент, Є. Д. Пономаренко, доцент,
К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор, С. М. Биканов, канд. техн. наук, доцент

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО РЕАКТОРА ІДЕАЛЬНОГО ЗМІШУВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОБ'ЄМУ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: математичне моделювання, імітаційне моделювання, хімічний реактор, оптимізація, реактор ідеального змішування, CSTR, симуляція, DWSIM.

Вступ. У сучасній хімічній технології моделювання процесів є ключовим етапом при розробці та оптимізації обладнання. Одним із найпоширеніших об'єктів для досліджень у цьому контексті виступає реактор ідеального змішування (РІЗ), який виступає однією з базових моделей у хімічній інженерії. Його широке використання зумовлене простотою конструкції, передбачуваністю динаміки та можливістю математичного опису з достатньою точністю для реальних застосувань [1, 2].

Коректне математичне моделювання має дозволяти створювати формалізований опис фізико-хімічних процесів у реакторі на основі рівнянь балансу маси та енергії. Це забезпечує змогу аналізувати вплив різних параметрів на перебіг реакцій, передбачати поведінку системи за різних умов та визначати оптимальні режими роботи [3]. Проте математичне моделювання зазвичай потребує суттєвих спрощень, що може обмежувати точність отриманих результатів у складних або змінних режимах.

Через це дедалі більшого значення набуває імітаційне моделювання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Інструментом даного дослідження обраний DWSIM – безкоштовне потужне середовища для хіміко-технологічного моделювання, яке підтримує побудову моделей з урахуванням реальних термодинамічних властивостей речовин, теплових ефектів, кінетики реакцій тощо [4, 5]. Імітаційні моделі, що реалізуються в DWSIM, базуються на тих самих принципах, що й математичні, але дозволяють уникати обмежень аналітичного вирішення складних задач.

Основним питанням, яке розглядається у роботі, є порівняння ефективності та точності математичних та імітаційних методів моделювання процесів у РІЗ. З одного боку, важливо обґрунтувати достовірність математичних моделей для подальшої імітації. З іншого – перевірити відповідність симуляцій результатам, очікуваним на основі теоретичних розрахунків. Мета роботи – дослідити принципи побудови математичної та імітаційної моделей реактора ідеального змішування, оцінити обмеження, порівняти потенційні результати та надати оцінку їх збіжності з фізичними процесами.

Аналіз літератури. Реактор ідеального змішування (англійське позначення – CSTR, Continuous Stirred Tank Reactor), є фундаментальною моделлю в теорії хімічної техніки. Властивість підтримувати однорідний склад в усьому об'ємі робить цю модель достатньо простою, контрольованою та зручною для розробки й перевірки математичного та комп'ютерного методів. У сучасній науковій літературі питання моде-

лювання РІЗ вкрай активно розглядаються як з точки зору побудови математичних моделей, так і з позицій комп'ютерної симуляції [1–3].

Класичні підходи до математичного опису РІЗ базуються на застосуванні диференціальних рівнянь балансу маси, що враховують надходження реагентів, швидкість реакції та витрати продуктів. Fogler [2] наводить розгорнутий аналіз як стаціонарного, так і нестаціонарного режиму роботи реактора, з акцентом на вплив кінетичних параметрів реакції. Вітчизняні дослідники, зокрема, Каспрук [1] та Лозовський [3], подають детальне пояснення методів лінеаризації та чисельного інтегрування рівнянь для багатостадійних реакцій у РІЗ.

Сучасна наукова література часто наголошує на важливості верифікації математичних моделей через чисельні експерименти. Зокрема, у роботі Towler і Sinnott [5] розглядаються приклади впровадження моделей РІЗ у процесах виробництва сірчаної кислоти та аміаку, а праці Писаренко [6] та Ніконова [7] висвітлюють методи апроксимації кінетичних даних та їх вплив на точність моделі.

Здійснювати потрібні експерименти за допомогою традиційних розрахунків – довго, втілювати фізично – вкрай витратно, але за допомогою імітаційного ПЗ, на кшталт DWSIM [4], такі задачі не лише багаторазово спрощуються, але й майже не вимагають видатків. Тому окрему групу становлять праці, присвячені виключно імітаційному моделюванню у спеціалізованому ПЗ. Зокрема, DWSIM нерідко використовується як гнучкий та потужний інструмент для моделювання ХТП [4, 8]. Відкритий код, інтеграція з базами фізико-хімічних даних (наприклад, DIPPR), підтримка усіх ключових моделей термодинаміки (Peng-Robinson, NRTL, UNIQUAC тощо) та реакційної кінетики робить його зручним для навчальних та дослідницьких цілей [9].

На практиці, ефективність симуляцій у DWSIM багато у чому залежить від якості математичних моделей, на основі яких вони побудовані. Цей зв'язок висвітлено, зокрема, в роботі Medina [10], де симуляції для РІЗ були порівняні з аналітичними рішеннями та даними реального експерименту. Подібні дослідження вказують на гарну збіжність між числовими результатами математичних та програмних моделей, за умови правильної постановки задачі.

Додатково варто відзначити внесок новітніх підходів, зокрема машинного навчання, у підвищення точності моделювання РІЗ. У роботі Misir [11] ідеться про поєднання емпіричних даних та гібридних моделей, де DWSIM використовується як джерело структурованих симуляційних даних для навчання нейромережових моделей. Це відкриває нові можливості для адаптивного контролю реакторів у режимі реального часу.

На українських теренах також проводяться активні дослідження. Наприклад, у практикумі [12] наведено численні приклади практичної реалізації математичних моделей для різних типів реакторів, зокрема РІЗ, з детальними методичними рекомендаціями щодо чисельного розв'язання систем рівнянь.

Таким чином, наявна література свідчить про високий рівень розробки математичних і імітаційних моделей реакторів ідеального змішування. Проте потреба у зіставленні цих підходів та оцінці їх відповідності реальним фізичним процесам залишається актуальною. Саме це й визначає доцільність подальших досліджень у даному напрямку.

Математичне моделювання. Модель РІЗ передбачає миттєве та повне змішування усіх реагентів в об'ємі реактора та дозволяє точно передбачити поведінку системи при сталому або змінному режимі роботи, забезпечуючи високу швидкість розрахунків та достатню точність у більшості технологічних задач [2, 3].

Математична модель РІЗ базується на принципі балансу маси, а у загальному випадку – балансу маси, енергії та імпульсу. Для найпростішої однорідної необерненої реакції першого порядку типу $A \rightarrow B$, математична модель у стаціонарному режимі зводиться до диференціального рівняння:

$$V \frac{dC_A}{dt} = F(C_{A0} - C_A) - V \cdot r_A(C_A), \quad (1)$$

де V – об'єм реактора, м^3 ; C_A – концентрація реагенту A у реакторі, $\text{моль}/\text{м}^3$; t – час, с ; C_{A0} – концентрація реагенту A на вході, $\text{моль}/\text{м}^3$; F – об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{с}$; $r_A(C_A)$ – швидкість реакції, $\text{моль}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Для реакції першого порядку $r_A = k \cdot C_A$, отже стаціонарне рівняння набуває вигляду:

$$0 = F(C_{A0} - C_A) - V k C_A. \quad (2)$$

Звідси можна отримати концентрацію реагенту A на виході:

$$C_A = \frac{C_{A0}}{1 + k \cdot \tau}, \quad (3)$$

де $\tau = V/F$ – середній час перебування речовини у реакторі.

У нестаціонарному режимі задача описується як початково-крайова для звичайного диференціального рівняння першого порядку:

$$\frac{dC_A}{dt} = \frac{F(C_{A0} - C_A)}{V} - k C_A, \quad (4)$$

що може бути вирішене чисельними методами, наприклад, методом Ейлера, Рунге-Кутти або вбудованими засобами інтегрування у MATLAB чи на мові Python [1, 12].

У разі наявності теплових ефектів модель просто доповнюється енергетичним балансом:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \frac{F \rho C_p (T_0 - T)}{V} + (-\Delta H) k C_A - U A (T - T_{сер}), \quad (5)$$

де ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$; C_p – питома теплоємність при сталому тиску, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T_0 – температура вхідного потоку, К ; T – температура в реакторі, К ; ΔH – теплота реакції, $\text{Дж}/\text{моль}$; k – константа швидкості реакції, с^{-1} ; U – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; A – площа теплообміну, м^2 ; $T_{сер}$ – температура навколишнього середовища або охолоджувача, К [10].

З погляду фізичної репрезентації, можна стверджувати, що ліва частина рівняння описує накопичення тепла у системі, перший доданок праворуч – тепло, що надходить із вхідним потоком, другий – тепловий ефект хімічної реакції, а третій – теплообмін із навколишнім середовищем через стінки реактора. Здебільшого це рівняння застосовується для нестаціонарного (перехідного) режиму роботи реактора. З практичної

точки зору така модель РІЗ може застосовуватися при аналізі кінетичних закономірностей, проектуванні та масштабуванні хімічних реакторів, моделюванні перехідних процесів (наприклад, моментів запуску установки) та оптимізації технологічних режимів.

Важливою перевагою математичної моделі РІЗ є можливість узагальнення на випадки багатокомпонентних, багатостадійних або оборотних реакцій. Такі модифікації моделі описані у працях Лозовського [3] та Misir [11].

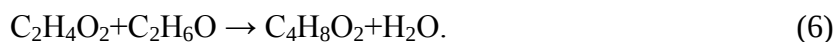
Хоча модель РІЗ ідеалізує поведінку реального реактора (повне змішування, відсутність градієнтів концентрації чи температури в об'ємі), численні експериментальні дослідження показали її високу адекватність у системах з інтенсивним перемішуванням і низькою в'язкістю [7, 13]. Особливо ефективною вона є в умовах неперервного виробництва, коли динаміка системи визначається не локальними, а глобальними параметрами. Однак у випадках сильно ендотермічних чи екзотермічних реакцій, нестабільної гідродинаміки або фазових переходів застосування базової моделі РІЗ може бути недостатнім – тоді її доповнюють розширеними варіантами з врахуванням теплових втрат, фазових меж або неоднорідностей потоку [6].

Загалом, математичне моделювання РІЗ дозволяє ще на етапі проектування виявити потенційні «вузькі місця» у роботі установки, проаналізувати чутливість системи до змін параметрів, знизити витрати на експерименти та мінімізувати ризики техногенних збоїв. Як показано в дослідженнях Писаренка [6] та Medina [10], коректно побудована модель здатна відтворити ключові характеристики процесу з точністю до 6–10 %.

Водночас, самі по собі математичні моделі, незважаючи на свою наочність та формальну строгість, обмежені з точки зору інтеграції великого обсягу емпіричних та фізико-хімічних даних. Саме тут на перший план виходить імітаційне моделювання, яке дозволяє реалізувати математичну основу у вигляді повноцінної цифрової моделі з урахуванням специфіки речовин, теплообмінних умов, реальних розмірів апаратів і навіть аварійних сценаріїв.

Імітаційне моделювання. Імітаційне моделювання РІЗ у DWSIM є етапом перевірки адекватності математичних припущень щодо реальної фізико-хімічної поведінки системи. У цьому дослідженні у якості об'єкту моделювання обрано процес етерифікації – взаємодія етанолу та оцтової кислоти з утворенням етилацетату та води у безперервному режимі з використанням реактора CSTR. Метою є відтворення умов, близьких до лабораторних або промислових, у яких дійсно можна дослідити характер переносу маси, термодинамічну взаємодію компонентів та, за потреби, розглядати потенційну реакційну взаємодію чи теплові ефекти.

У середовищі DWSIM схемним елементом, який реалізує базову модель РІЗ, виступає Continuous Stirred Tank Reactor. Основними вхідними параметрами є оціночний об'єм реактора, температура та тиск на вході, склад та масова витрата вхідного потоку та термодинамічний пакет для точного врахування міжмолекулярних взаємодій. У якості базової хімічної реакції моделюється наступна:



На виробництві процес є оборотним, гомогенним та каталізується кислотами. У нашому випадку модель будується з припущенням ізотермічних умов, що дозволяє спростити енергетичний баланс без втрати релевантності для лабораторного чи промислового масштабу.

Зазвичай прості симуляції у DWSIM починаються зі створення потоків реагентів з визначенням їхніх базових параметрів. Для спрощення демонстраційної моделі одразу обрано базові компоненти задачі та сформовано потік «Живлення реактора», що має наступний компонентний склад за мольними долями: етанол – 48 %, оцтова кислота – 50 % та вода – 2 % (щоб наблизити умови до реальних, у яких майже будь-який реактив містить залишки води). Звісно, що етилацетат, який стане головним продуктом реакції, у складі цього потоку відсутній. Суміш має температуру 70 °C та тиск 100 кПа. Масова витрата складає 1 кг/с. Параметри потоку «Живлення реактора» показані на рис. 1.

Compound	Amount
Ethanol	0,48
Acetic acid	0,5
Ethyl acetate	0
Water	0,02

Stream Conditions: Temperature 70,00 C, Pressure 100,00 kPa, Mass Flow 1,00 kg/s

Рисунок 1 – Ключові параметри потоку «Живлення реактора»

Обраний термодинамічний пакет NRTL (Non-Random Two-Liquid) дозволяє враховувати неідеальну поведінку компонентів у рідкій фазі. Система, що містить полярні сполуки, демонструє сильні міжмолекулярні взаємодії, які значною мірою впливають на фазову рівновагу. Саме модель NRTL здатна точно описати активність кожного компонента через облік енергії взаємодій між подібними й відмінними молекулами, що істотно підвищує точність симуляції у порівнянні з ідеальними моделями на основі закону Рауля [8].

Для відтворення хімічної реакції (6) задані компоненти-учасники кінетичної реакції, а у якості базового компоненту використовується етанол. Детальні налаштування реакції, яка відбувається у РІЗ, представлено на рис. 2.

Name	Molar Weight	ΔHf (kJ/kg)	Include	BC	Stoich. Coeff.	DO	RO
Ethanol	46,0684	-5100,02	☒	☒	-1	1	0
Acetic acid	60,052	-7207,09	☒	☐	-1	1	0
Ethyl acetate	88,1051	-5045,11	☒	☐	1	0	0
Water	18,0153	-13422,7	☒	☐	1	0	0

Equation: CH3CH2OH + CH3COOH <=> CH3COOC2H5 + H2O

Kinetic Reaction Parameters: Base Component: Ethanol, Phase: Liquid, Kinetics Specification: Simple, Rate Units: kmol/(m3.s)

Рисунок 2 – Налаштування кінетичної реакції у РІЗ

Кінетична модель реакції будується просто на основі закону діючих мас:

$$r = k_1 \cdot C_{EtOH} \cdot C_{HAc} - k_2 \cdot C_{EtAc} \cdot C_{H_2O}, \quad (7)$$

де r – швидкість реакції, моль/(м³·с); C_{EtOH} , C_{HAc} , C_{EtAc} , C_{H_2O} – концентрації етанолу, оцтової кислоти, етилацетату та води відповідно, моль/м³; k_1 , k_2 – прямі та зворотні константи швидкості реакції, 1/(моль·с).

Потік живлення подається до схемного об'єкту CSTR, який імітує реактор. У налаштуваннях задається початковий (пробний) об'єм реактора (0,1 м³) та ізотермічний режим його роботи. Програма автоматично підбиває баланс маси та енергії на основі внутрішнього чисельного ядра, яке використовує алгоритми, еквівалентні класичним методам чисельного інтегрування, наприклад, методу Ньютона-Рафсона чи модифікаціям Рунге-Кутти [8].

У процесі змішування виділяється значна кількість теплової енергії, що не тільки призводить до зниження температури продукту реактора, але й визначає необхідність підведення до нього енергетичного потоку – рис. 3.

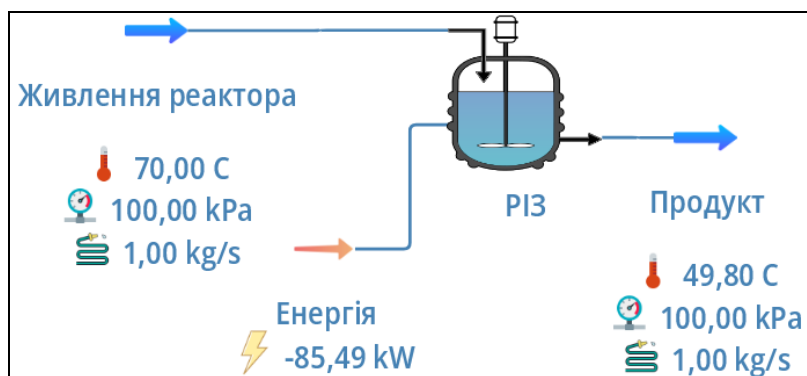


Рисунок 3 – Налаштування кінетичної реакції у РІЗ

У поточній задачі деталі реакційної взаємодії не моделюються, й головним є коректне відтворення процесу змішування та фазової рівноваги. Водночас, вкрай важливим є досягнення високої ступені конверсії речовин, які вступили у реакцію. У схемі з рис. 3 у реакторі досягаються надто низькі для промислових умов показники – рис. 4.

Results	
General	Reactions
Compound	Conversion (%)
Ethanol	60,8313
Acetic acid	58,398

Рисунок 4 – Ступінь конверсії реагентів у реакторі з пробним об'ємом

Бажана ступінь конверсії базового компоненту (етанолу) має складати не менше 98 %. Цю проблему можна вирішити шляхом встановлення спеціальної логічної операції Controller Block, яка зможе підібрати потрібний реакційний об'єм для досягнення вказаного показника. Цей схемний елемент налаштовано таким чином, щоб варіювання

об'єму реактора призводило до змін у ступені конверсії етанолу до моменту досягнення бажаної величини (з урахуванням припустимої похибки) – рис. 5.

Рисунок 5 – Налаштування логічної операції підбору реакційного об'єму

Результатом роботи операції підбору є досягнення цільового показника конверсії етанолу та збільшення конверсії оцтової кислоти з 58,398 % до 94,08 %. При цьому за розрахунками програми реальний (оптимізований) об'єм реактора повинен становити 21,33 м³, а температура продукту стабілізована на рівні потоку живлення – рис. 6.

Compound	Conversion (%)
Ethanol	98
Acetic acid	94,08

Рисунок 6 – Результат логічної операції підбору реакційного об'єму

При цьому після оптимізації об'єму реактора компонентний склад продуктового потоку також змінився потрібним чином (від стану на рис. 7а до стану на рис 7б) та почав відповідати цілям виробництва. Аналіз даних з рис. 7 чітко демонструє, що про-бний об'єм реактора був абсолютно недостатнім для ефективного перемішування реа-

гентів та підкреслює важливість підбору окремих величин для збільшення адекватності імітаційних моделей. На прикладі цієї задачі можна аналогічним чином здійснювати оцінку впливу окремих параметрів (температур, тисків, співвідношення компонентів, об'єму реактора) на розподіл концентрацій речовин у продуктовому потоці, готуватися до практичних експериментів або масштабування процесу.

Input Data Results Annotations Dynamics Floating Tables

Compounds Phase Properties

Amounts Properties

Basis Mole Fractions

☒ Show as percentages

Mixture Liquid 1

Compound	Amount
Ethanol	18,800984
Acetic acid	20,800984
Ethyl acetate	29,199016
Water	31,199016

a

Input Data Results Annotations Dynamics Floating Tables

Compounds Phase Properties

Amounts Properties

Basis Mole Fractions

☒ Show as percentages

Mixture Liquid 1

Compound	Amount
Ethanol	0,96000829
Acetic acid	2,9600083
Ethyl acetate	47,039992
Water	49,039992

б

Рисунок 7 – Компонентний склад потоку продукту реактору:
а – для пробного об'єму 0,1 м³; б – для оптимізованого об'єму 21,33 м³

Імітаційна модель розробленої технологічної схеми з оптимізованими параметрами РІЗ та ключовими характеристиками потоків наведена на рис. 8.

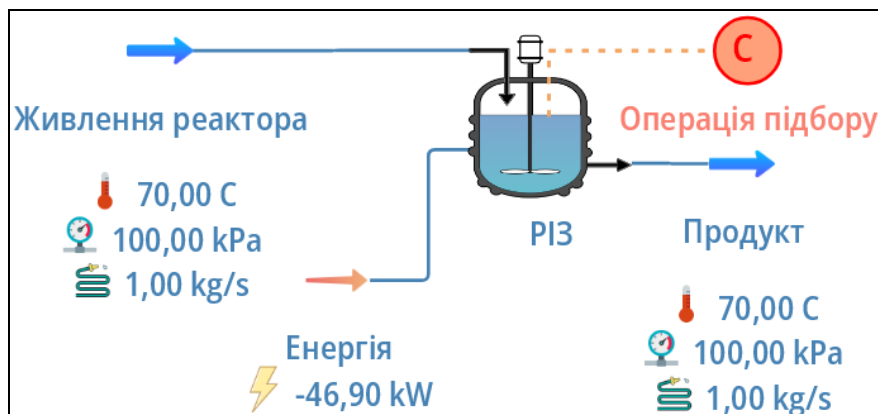


Рисунок 8 – Технологічна схема з оптимізованими параметрами РІЗ

Обговорення результатів

Не дивлячись на структурну простоту, змодельована система має значну практичну цінність. Реакція естерифікації широко використовується у виробництві розчинників, ароматизаторів та проміжних фармацевтичних продуктів. Саме тому можливість точно описувати процес у реакторі є критичною для оптимізації виробництва, забезпечення якості продукції та економічної ефективності.

Адекватність моделей підтверджується тим, що DWSIM використовує ті ж самі базові рівняння масового та енергетичного балансу, що й традиційна математична модель, але автоматизує обчислення і враховує більш повний спектр фізичних факторів. Завдяки цьому симуляція дозволяє побачити, наскільки зміщення певного параметру змінює весь процес, що доволі важко та довго втілюється при ручному розрахунку.

Математична модель РІЗ, побудована на основі диференціальних рівнянь масового балансу та закону діючих мас, дозволяє досить точно описати перебіг реакції в ідеалізованих умовах. Вона надає можливість швидко оцінити вплив початкових концентрацій, часу перебування, об'єму реактора та кінетичних констант на кінцевий вихід продуктів. Особливістю такого підходу є його прозорість і контрольованість – інженер чітко розуміє, які змінні впливають на результат, і як саме. Однак цей тип моделювання потребує численних спрощень – припущення про ідеальне змішування, постійну температуру, відсутність теплових втрат та ідеальну термодинамічну поведінку, що обмежує його застосування для реальних промислових процесів, у яких фактори міжмолекулярної взаємодії, фазових переходів або неоднорідностей середовища можуть суттєво впливати на результат.

У свою чергу, імітаційне моделювання в DWSIM дозволило значно глибше і реалістичніше відтворити перебіг процесу. Завдяки використанню термодинамічного пакету NRTL враховано неідеальну поведінку системи, зокрема активність кожного з компонентів у рідкій фазі. Можливість врахування зворотної реакції та точного завдання концентрацій, температур та витрат у реальних одиницях, а також автоматичне розв'язання рівнянь системи з підбором цільового параметру роблять симуляцію точнішою та ближчою до виробничої реальності та прикладних проєктувальницьких задач.

Цей результат підтверджує, що математична модель є достатньою для попереднього проєктного аналізу або швидкої оцінки системи. Водночас імітаційне моделювання доцільно використовувати на пізніших етапах – при деталізації параметрів, адаптації до конкретного обладнання, розробці технічних регламентів або для навчання персоналу. Особливо корисною така модель є у випадках, коли потрібно швидко оцінити реакцію системи на зміну одного або кількох параметрів у широкому діапазоні.

З огляду на вищезазначене, можна стверджувати, що поєднання математичного та імітаційного моделювання є оптимальною стратегією для інженерного аналізу РІЗ. Це дозволяє отримувати як фундаментальні висновки, так і високоточні симуляції, які гарно відповідають умовам реального виробничого процесу.

Висновки

У ході дослідження здійснено описове математичне та імітаційне моделювання процесу естерифікації етанолу та оцтової кислоти у реакторі ідеального змішування. Аналітична модель продемонструвала свою ефективність для попереднього аналізу та оцінки впливу основних параметрів на хід реакції. Вона є швидким і точним інструментом при відносно простих умовах моделювання. Імітаційна модель, реалізована у DWSIM із використанням термодинамічного пакету NRTL, дозволила детально змодельовувати процес із врахуванням неідеальностей системи та зворотної реакції. Вона виявилась більш точною та гнучкою, зручнішою для практичного застосування, зокрема на етапі оптимізації та адаптації до реального обладнання. Загалом, поєднання математичних та імітаційних моделей дає змогу глибоко досліджувати хімічні процеси, підвищувати їхню ефективність і забезпечувати надійність технологічних рішень у сучасній хімічній інженерії.

Література

1. Каспрук О. А. Основи математичного моделювання хіміко-технологічних процесів : навч. посіб. Київ : НУХТ, 2014. 236 с.

2. Fogler H. S. Elements of Chemical Reaction Engineering. 5th ed. Pearson Education, 2016. 992 p.
3. Лозовський І. М. Математичне моделювання процесів у хімічних реакторах. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2008. 168 с.
4. Medeiros D. DWSIM – Open Source Process Simulator. URL: <https://dwsim.org>.
5. Towler G., Sinnott R. Chemical Engineering Design. 2nd ed. Elsevier, 2012. 1320 p.
6. Писаренко І. І. Математичне моделювання хімічних реакційних систем. Київ : Техніка, 2007. 192 с.
7. Ніконов І. А. Основи моделювання процесів у хімічній технології. Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2015. 211 с.
8. DWSIM Documentation. URL: <https://docs.dwsim.io>.
9. Soares A. Modeling chemical reactors in DWSIM : Tutorial and examples. São Paulo : DWSIM Tutorials, 2021.
10. Medina A., Rodríguez R., Barajas J. Comparison of CSTR performance: mathematical model vs. simulation in DWSIM. *Computers & Chemical Engineering*. 2020. Vol. 135. P. 106744.
11. Misir M., Altıntaş D., Kıran Ş. Hybrid modeling of chemical reactors using DWSIM and machine learning algorithms. *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 253. P. 117532.
12. Математичне моделювання хіміко-технологічних процесів. Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: А. О. Абрамова. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,75 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 114 с.
13. Бедрій А. В. Основи чисельних методів у хімічній інженерії : навч. посіб. Дніпро : НГУ, 2016. 190 с.
14. Лантухова О. Г. Дослідження гідродинаміки реакторів із змішуванням. Харків : ХТУРЕ, 2014. 145 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kaspruk O. A. (2014). Osnovy matematychnoho modeliuvannia khimiko-tekhnologichnykh protsesiv: navch. posib. Kyiv: NUKhT, 236 p.
2. Fogler H. S. (2016). Elements of Chemical Reaction Engineering. 5th ed. Pearson Education, 992 p.
3. Lozovskyi I. M. (2008). Matematychno modeliuvannia protsesiv u khimichnykh reaktorakh. – Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki, 168 p.
4. Medeiros D. DWSIM – Open Source Process Simulator. URL: <https://dwsim.org>.
5. Towler G., Sinnott R. (2012). Chemical Engineering Design. 2nd ed. Elsevier, 1320 p.
6. Pysarenko I. I. (2007). Matematychno modeliuvannia khimichnykh reaktsiinykh system. Kyiv: Tekhnika, 192 p.
7. Nikonov I. A. (2015). Osnovy modeliuvannia protsesiv u khimichnii tekhnologii. Kharkiv: KhNU im. V. N. Karazina, 211 p.
8. DWSIM Documentation. URL: <https://docs.dwsim.io>
9. Soares A. (2021). Modeling chemical reactors in DWSIM: Tutorial and examples. São Paulo: DWSIM Tutorials.

10. Medina A., Rodríguez R., Barajas J. (2020). Comparison of CSTR performance: mathematical model vs. simulation in DWSIM. *Computers & Chemical Engineering*, 135, 106744.
11. Misir M., Altıntaş D., Kıran Ş. (2022). Hybrid modeling of chemical reactors using DWSIM and machine learning algorithms. *Chemical Engineering Science*, 253, 117532.
12. Matematychnе modeliuвання khimiko-tekhnolohichnykh protsesiv. Kompiuternyi praktykum 2023. [Elektronnyi resurs]: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 161 «Khimichni tekhnolohii ta inzheneriia». KPI im. Ihoria Sikorskoho ; uklad. A. O. Abramova. – Elektronni tekstovi danni (1 fail: 2,75 Mbait). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 114 p.
13. Bedrii A. V. (2016). Osnovy chyselnykh metodiv u khimichnii inzhenerii : navch. posib. Dnipro: NHU, 190 p.
14. Lantukhova O. H. (2014). Doslidzhennia hidrodynamiky reaktoriv iz zmishuvanniam. Kharkiv: KhTURE, 145 p.

УДК 62-92:66.01

A. М. Миронов, М. В. Ільченко, О. О. Гапонова, Є. Д. Пономаренко, К. О. Горбунов,
С. М. Биканов

МАТЕМАТИЧНЕ ТА ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО РЕАКТОРА ІДЕАЛЬНОГО ЗМІШУВАННЯ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ОБ'ЄМУ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА

У статті наведено результати дослідження, присвяченого математичному та імітаційному моделюванню реактора ідеального змішування (PIЗ) із метою оптимізації об'єму робочого середовища для процесу етерифікації оцтової кислоти етанолом. Розглянуто класичні підходи до побудови математичних моделей на основі рівнянь балансу маси та енергії, у тому числі для випадків стаціонарного та нестаціонарного режимів. Визначено переваги аналітичних методів для початкового аналізу та попередніх розрахунків за наявності відносно простих технологічних умов. Показано, що математична модель дозволяє з достатньою точністю оцінити динаміку змін концентрацій та обґрунтувати технологічні параметри при проектуванні ключового виробничого обладнання.

Особливу увагу приділено побудові імітаційної моделі у середовищі DWSIM з використанням термодинамічного пакету NRTL, що забезпечує точне відтворення неідеальної поведінки полярних компонентів рідкої фази. Симульовано оборотну гомогенну кінетичну реакцію етерифікації у безперервному режимі в умовах ізотермічної експлуатації реактора ідеального змішування. За результатами симуляції визначено ступені конверсії реагентів, а також встановлено, що початково заданий об'єм реактора є недостатнім для досягнення промислових показників. Запропоновано використання логічного блоку керування для автоматичного підбору оптимального об'єму, що дозволяє досягти необхідної глибини перетворення базового реагенту (етанолу) понад 98 %.

Проведено порівняльний аналіз результатів математичного та симуляційного моделювання, який вказує на високу адекватність математичних моделей при їх правильній постановці для оцінки базових характеристик технологічного процесу та параметрів обладнання. Підкреслено, що імітаційне моделювання дозволяє враховувати набагато ширший спектр фізико-хімічних факторів, адаптуватися до конкретних умов виробництва, а також швидко досліджувати вплив технологічних змін без потреби у фізичних експериментах. Стаття доводить доцільність поєднання обох підходів у практиці

комп'ютерної хімічної інженерії для забезпечення максимальної точності, гнучкості, надійності та технологічної ефективності рішень.

Ключові слова: математичне моделювання, імітаційне моделювання, хімічний реактор, оптимізація, реактор ідеального змішування, CSTR, симуляція, DWSIM.

A. M. Myronov, M. V. Ilchenko, O. O. Gaponova, Ye. D. Ponomarenko, K. O. Gorbunov,
S. M. Bykanov

MATHEMATICAL AND SIMULATION MODELLING OF AN IDEAL MIXING CHEMICAL REACTOR FOR OPERATING ENVIRONMENT VOLUME OPTIMISING

The article presents the results of a comprehensive study of mathematical and simulation modeling of a continuous stirred tank reactor (CSTR) aimed at optimizing the operating volume during the esterification of acetic acid with ethanol. Classical approaches to building mathematical models based on mass and energy balance equations, including stationary and non-stationary regimes, are analyzed. The analytical methods are shown to be effective for preliminary process analysis and parameter estimation under relatively simple technological conditions. The mathematical model is demonstrated to predict dynamics of changes in concentrations and justify technological parameters when designing key production equipment with acceptable accuracy.

Special focus is given to the simulation of the CSTR in the DWSIM environment using the NRTL (Non-Random Two-Liquid) thermodynamic model, which accurately captures the non-ideal interactions of polar liquid-phase components. A reversible homogeneous kinetic esterification reaction was simulated under isothermal conditions in a continuous mode. The simulation results included evaluation of reactant conversion levels and showed that the initial reactor volume was insufficient to reach industrial-level conversion. To solve this, a controller block was implemented to automatically select the optimal reactor volume needed to achieve over 98 % conversion of the base reactant (ethanol).

A comparative analysis of mathematical and simulation results modeling was conducted, which indicates the high adequacy of mathematical models when they are properly defined for assessing the basic characteristics of the technological process and equipment parameters. Underlined that simulation modeling in DWSIM provides the advantage of integrating a broader range of physical and chemical parameters, adapting to real process conditions, and exploring variable scenarios without conducting physical experiments. The paper substantiates the practical value of combining both modeling approaches to enhance maximum accuracy, flexibility, robustness, and process efficiency in practices of computer chemical engineering and equipment design decisions.

Keywords: mathematical modelling, simulation modelling, chemical reactor, optimization, ideal mixing reactor, CSTR, simulation, DWSIM.

І. М. Фик, д-р техн. наук, професор, С. В. Кривуля, канд. геол. наук

ЩОДО ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВІДНОВЛЕННЯ ЗАПАСІВ ГАЗУ НА ПРИКЛАДІ ШЕБЕЛИНСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: родовище, пластовий тиск, обводнення, розробка, пружність, колектор.

Вступ. В історії розвитку нафтогазової промисловості по мірі «виснаження» газоконденсатних родовищ, періодично підіймалися питання відновлення запасів вуглеводнів за рахунок різних факторів, включаючи можливість перетоків, дифузії, початкових градієнтів тисків, водонапірних систем, просідання поверхні, пружності порід та флюїдів, проривів високонапірного газу із глибоких горизонтів в поклади, що розробляються.

Аналіз основних досягнень і літератури. В роботах українських вчених неодноразово проводились дослідження з можливості відновлення запасів газу за рахунок перетоків із глибоких горизонтів в поклади, що розробляються. [1,2]

Так, академик Лукін О.Ю., взагалі вважає, що дегазація Землі іде постійно, а в зонах відпрацьованих газонафтових родовищ, враховуючи низький пластовий тиск, взагалі ідеальні умови для відновлення їх запасів. Правда таке явище можливе за умови сприятливих геолого-промислових умов. [3]

В роботах Фесенко Ю.Л. та інших було сформульовано ряд факторів, які впливають на відновлення запасів газу враховуючи і перетоки газу із глибоких горизонтів. [4]

А в роботах Абеленцева В.М. та Кривулі С.В. було вивчено геологічні умови вилучення залишкових запасів газу, в тому числі із родовищ Шебелинсько-Хрещищенської групи родовищ. [5,6]

В роботі Суярко В.Г., розглядалися питання пошуку та розвідки родовищ вуглеводнів, в тому числі на великих глибинах, поклади яких можуть бути генеруючими родовищами для відновлення запасів. [7]

В роботах [8,9] представлені конкретні матеріали відновлення запасів в покладах Шебелинського ГКР, та показано джерела і шляхи їх перетікання.

В роботі [10] авторами розглянуто вплив природних факторів підтримування пластового тиску на пізній стадії розробки газових та газоконденсатних родовищ. В цій роботі відокремлено відновлення запасів від звичайного підтримування пластового тиску.

В роботі Бондаря А.Л. вивчалась проблема деформації земної поверхні при розробці Шебелинського ГКР. Автори відмічають, що просідання поверхні над родовищами, що розробляються, пов'язане з падінням пластового тиску. [11]

Однак, в наведених та інших роботах ніхто із авторів не розглядав питання економічної ефективності від відновлення запасів газу в родовищ на пізній стадії їх експлуатації.

В роботах [4,6,10] показано, що на пізній стадії експлуатації Шебелинського ГКР діє ряд факторів впливу на підтримання пластового тиску, до таких слід віднести:

- водонапірний режим;
- просідання поверхні;
- дію початкових градієнтів тиску;
- дію пружних факторів породи, води і газу.

Вказані фактори перестають впливати на підтримування пластового тиску на пізній стадії розробки родовища.

Про це свідчить стабілізація пластових тисків в покладах Шебелинського ГКР. [10]

В табл. 1 наведені фактичні та прогрозні данні (2016-2023 рр.) розробки Шебелинського ГКР без урахування відновлення запасів газу, за даними ГПУ «Шебелинка-газвидобування».

Таблиця 1 – Порівняння фактичних і прогностичних даних розробки Шебелинського ГКР за 2016-2023 рр

Показники	Роки								Разом
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Фактичний видобуток газу, млрд.м ³	2,237	2,173	2,253	2,107	1,951	1,843	1,790	1,804	16,158
Прогностичний видобуток газу (без урахування перетоку), млрд.м ³	2,222	2,170	2,060	1,700	1,600	1,550	1,500	1,450	14,252
Додатковий видобуток за рахунок відновлення запасів, млрд.м ³	0,015	0,003	0,193	0,407	0,351	0,293	0,290	0,354	1,906

На рис. 1 показано, по роках, показники видобутку газу з урахуванням та без урахування перетоків та додатковий видобуток за період з 2016 і 2035рр.

Згідно табл. 1 додатковий видобуток газу за рахунок перетікання газу із глибоких горизонтів в поклади, що розробляються, лише за 2016–2023 рр. сумарно склав 1,906 млрд. м³.

Описаний процес здійснив вагомий вплив на економічну ефективність розробки Шебелинського родовища – так, навіть в умовах спрямування газу власного видобутку на потреби невиробничих споживачів із відповідним штучним ціноутворенням згідно [13], розрахунковий економічний ефект газовидобувного підприємства за показником чистого прибутку за період 2016–2023 рр. склав 6,67 млрд. грн.

Розрахунок додаткового чистого прибутку за період 2016–2023 рр. завдяки відновленню запасів Шебелинського родовища наведений в табл. 2.

Додатковий видобуток газу за рахунок перетоків в наступних періодах можна вважати лише прогностичним, оскільки фактичний видобуток газу на дату написання роботи невідомий. За період 2024–2035 років, виходячи з табл. 1, додатковий видобуток газу за рахунок перетоків складе близько 7,96 млрд. м³.

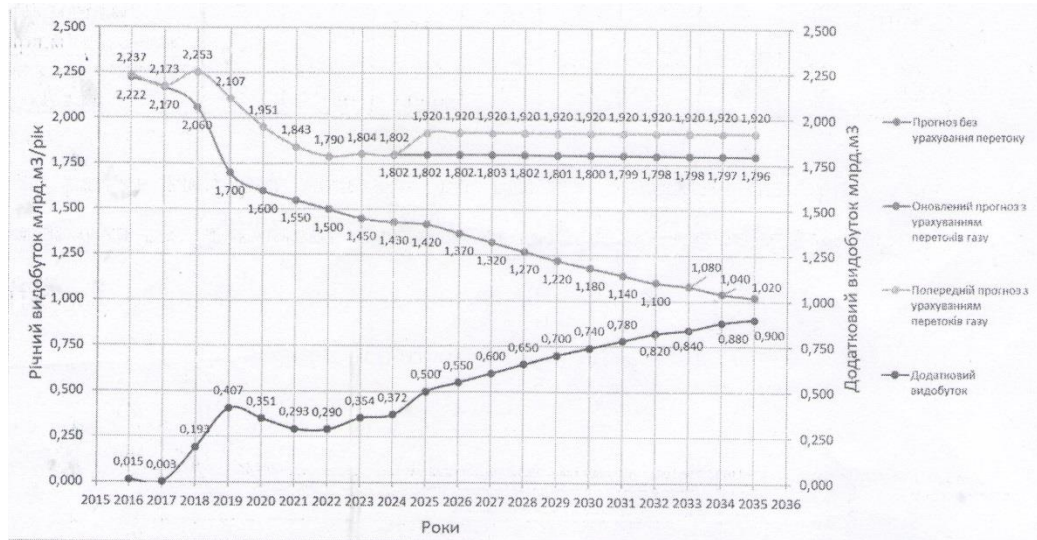


Рисунок 1 – Додатковий видобуток газу за рахунок відновлення запасів

Таблиця 2 – Розрахунок додаткового чистого прибутку за період 2016–2023 рр. завдяки відновленню запасів Шебелинського родовища

Показники	Роки								Разом
	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Додатковий видобуток за рахунок відновлення запасів, млн.м ³	15,0	3,0	193,0	407,0	351,0	293,0	290,0	354,0	1906,0
Умовно-змінні витрати на видобуток газу (рентна плата, умовно-змінні виробничі витрати, плата за користування магістральними газопроводами), грн/тис.м ³	1804,2	1807,1	1830,2	2217,6	1885,4	1904,3	1908,5	1904,6	
Прибуток від додаткового видобутку газу, млн. грн.	58,9	11,08	766,2	1997,3	1435,3	1209,8	1196,2	1461,6	8137,1
Чистий прибуток, млн. грн.	48,3	9,7	628,3	1637,8	1176,9	992,0	980,9	1198,5	6672,4

Розрахунок прогнозного додаткового видобутку газу Шебелинського родовища за рахунок відновлення запасів за період з 2025–2035 рр. наведений в табл. 3.

Для подальшої економічної оцінки перспектив описаного процесу розробки розглянуті два підходи:

1) оцінка чистого прибутку від нарощування запасів за умов експлуатації Шебелинського родовища поточним фондом експлуатаційних свердловин;

2) оцінка грошового потоку від буріння і підключення проектних свердловин для досягнення прогнозного видобутку газу, але за відсутності відновлення запасів.

Таблиця 3 – Розрахунок прогнозного додаткового видобутку газу Шебелинського родовища за рахунок відновлення запасів

Показники	Роки											Разом
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Прогнозний видобуток газу, млрд.м ³ /рік	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	21,12
Оновлений прогнозний видобуток газу, з урахуванням перетоків, млрд.м ³ /рік	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	19,8
Прогнозний видобуток газу без урахування перетоку, млрд.м ³ /рік	1,42	1,37	1,32	1,27	1,22	1,18	1,14	1,10	1,08	1,04	1,02	13,16
Додатковий видобуток газу за рахунок відновлення запасів, від попереднього млрд.м ³ /рік	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,74	0,78	0,82	0,84	0,88	0,9	7,96
Додатковий оновлений прогнозний видобуток газу за рахунок відновлення запасів, млрд.м ³ /рік	0,38	0,43	0,48	0,53	0,58	0,62	0,66	0,70	0,72	0,76	0,78	5,86

Оцінка чистого прибутку від нарощування запасів за умов експлуатації Шебелинського ГКР поточним фондом експлуатаційних свердловин виконана за економічних умов, аналогічних прийнятим для розрахунку чистого прибутку в табл. 2. Ціна реалізації природного газу прийнята згідно [13] на весь розглянутий період.

Результати розрахунку прогнозного чистого прибутку від нарощування запасів за умов експлуатації Шебелинського родовища поточним фондом експлуатаційних свердловин наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Розрахунок прогнозного чистого прибутку від нарощування запасів за умов експлуатації Шебелинського родовища поточним фондом експлуатаційних свердловин

Показники	Роки											Разом
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Прогнозний видобуток газу (з урахування перетоку), млрд.м ³	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	21,12
Прогнозний видобуток газу (без урахування перетоку), млрд.м ³	1,42	1,37	1,32	1,27	1,22	1,18	1,14	1,10	1,08	1,04	1,02	13,16
Додатковий видобуток за рахунок відновлення запасів, млрд.м ³	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,74	0,78	0,82	0,84	0,88	0,9	7,96
Умовно-змінні витрати на видобуток газу (рентна плата, умовно-змінні виробничі витрати, плата за користування магістральними газопроводами), грн/тис.м ³	1933,7	187,6	191,2	1944,5	1948,1	1951,7	1955,3	1958,9	1962,5	1966,1	1969,7	
Прибуток від додаткового видобутку газу, млн. грн.	2049,8	3215,1	3505,3	2637,8	2859,7	3020,4	3180,9	3341,1	3419,5	3579,2	3657,3	34486,0
Чистий прибуток, млн. грн.	1680,9	2636,4	2874,3	2179,4	2344,9	2476,7	2608,3	2739,7	2804,0	2934,9	2999,0	28278,6

Таким чином, згідно табл. 4 очікуваний чистий прибуток від нарощування запасів протягом 2025–2035 рр. становитиме 28,3 млрд. грн. за попереднім варіантом, за оновленим від 21 млрд. грн.

Для оцінки грошового потоку від буріння проектних свердловин, призначених для отримання прогнозних обсягів видобутку, але без нарощування запасів родовища, були виконані наступні попередні розрахунки:

1) оцінена поточна продуктивність свердловин Шебелинського родовища, що обмежує продуктивність проектних свердловин;

2) визначена кількість проектних свердловин, необхідна для видобування прогнозних обсягів додаткового видобутку газу завдяки відновленню запасів;

3) виконано розрахунки грошового потоку від спорудження і підключення проектних свердловин, що забезпечуватимуть додатковий видобуток газу на рівні прогнозних темпів відновлення запасів родовища.

Розрахунок кількості проектних свердловин, необхідних для видобування прогнозних обсягів додаткового видобутку газу завдяки відновленню запасів, наведений в табл. 5.

Таблиця 5 – Розрахунок кількості проектних свердловин, необхідних для видобування прогнозних обсягів додаткового видобутку газу завдяки відновленню запасів

Показники	Роки											Разом
	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Прогнозний видобуток газу (з урахування перетоку), млрд.м ³	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	1,92	21,12
Прогнозний видобуток газу (без урахування перетоку), млрд.м ³	1,42	1,37	1,32	1,27	1,22	1,18	1,14	1,10	1,08	1,04	1,02	13,16
Додатковий видобуток за рахунок відновлення запасів, млрд.м ³	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,74	0,78	0,82	0,84	0,88	0,9	7,96
Середньорічний видобуток 1 св. (за наявного фонду), млн.м ³	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	4,800	
Кількість свердловин, необхідних для отримання додаткового видобутку, од.	104	115	125	135	146	154	163	171	175	183	188	

Згідно табл. 4, забезпечення додаткового видобутку газу на рівні обсягів відновлення запасів потребує введення в експлуатацію к 2025 року 104 проектні свердловини із щорічним збільшенням експлуатаційного фонду на 4–10 свердловин.

В розрахунках враховано, що згідно з чинним податковим законодавством [14, стаття 252.20], ставка рентних платежів для природного газу, видобутого свердловинами, буріння яких розпочалось після 1 січня 2018 року, вагомо відрізняється від ставки рентних платежів для існуючих свердловин. Так, для глибини залягання покладів Шебелинського родовища рентна плата на обсяги видобутку газу для існуючих свердловин становить 29 % від валового доходу, тоді як для проектних свердловин – лише 16 %, що відображає державну політику стимулювання нарощування власного видобутку газу.

За наявності додаткових капітальних вкладень оцінку проведено за показником щорічного грошового потоку, розрахованого за формулою [15]:

$$ГП = ЧП + А - К, \quad (1)$$

де ГП – грошовий потік за період, млн. грн.; ЧП – чистий прибуток за відповідний період, млн. грн.; А – амортизаційні нарахування за відповідний період, млн. грн.; К – капітальні вкладення за відповідний період, млн. грн.

Розрахунок грошового потоку від спорудження проектних свердловин для отримання додаткового видобутку, аналогічно додатковому видобутку внаслідок відновлення запасів, виконаний виходячи з вартості будівництва і підключення проектних свердловин сервісною філією АТ «Укргазвидобування» із витратами на рівні собівартості робіт.

Результати розрахунку грошового потоку від спорудження проектних свердловин наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Розрахунок грошового потоку від спорудження проектних свердловин для отримання додаткового видобутку, аналогічного додатковому видобутку внаслідок відновлення запасів

Показники	Роки												Разом
	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035	
Обсяги додаткового видобутку газу, млн.м ³		500,0	550,0	600,0	650,0	700,0	740,0	780,0	820,0	840,0	880,0	900,0	7960,0
Кількість свердловин на кінець року, од.		104	115	125	135	146	154	163	171	175	183	188	
Обсяги буріння проектних свердловин, од.	104	10	10	10	10	8	8	8	4	8	4		
Капітальні вкладення, млн. грн.	9615,8	961,6	961,6	961,6	961,6	769,3	769,3	769,3	384,6	769,3	384,6	0,0	17308,4
Експлуатаційні витрати, млн. грн.		1288,6	1419,5	1550,7	1682,3	1814,2	1920,5	2027,1	2134,0	2189,1	2296,5	2352,0	20674,5
в т.ч. умовно-постійні, млн.грн.		72,9	80,2	87,5	94,8	102,1	107,9	113,8	119,6	122,5	128,3	131,3	1160,8
умовно-змінні, млн.грн.		92,0	103,2	114,7	126,6	138,9	149,5	160,4	171,6	178,8	190,4	198,0	1624,1
рентна плата, млн.грн.		482,7	530,9	579,2	627,5	675,7	714,3	753,0	791,6	810,9	849,5	868,8	76 84,1
амортизація, млн.грн.		641,1	705,2	769,3	833,4	897,5	948,8	1000,0	1051,3	1077,0	1128,3	1153,9	10205,6
Валовий доход, млн.грн.		3016,7	3318,3	3620,0	3921,7	4223,3	4464,7	4706,0	4947,3	5068,0	5309,3	5430,0	48025,3
Прибуток, млн.грн.		1728,0	1898,8	2069,3	2239,4	2409,2	2544,2	2678,9	2813,3	2878,9	3012,8	3078,0	27350,8
Чистий прибуток, млн.грн.		1417,0	1557,1	1696,8	1836,3	1975,5	2086,2	2196,7	2306,9	2360,7	2470,5	2524,0	22427,7
Вільний грошовий потік, млн.грн.	- 9615,8	1096,5	1300,6	1504,5	1708,1	2103,7	2265,7	2427,5	2973,6	2668,4	3214,1	3677,9	15324,8
Накопичений вільний грошовий потік, млн.грн.	- 9615,8	- 8519,3	- 7218,7	-5 714,2	-4 006,1	- 1902,4	-363,3	2790,8	5764,4	8432,8	11646,9	15324,8	

Висновки. За результатами проведених розрахунків можна зробити висновок, що відновлення запасів за рахунок перетікання газу в поклади, що розробляються, створюють вагомі економічні здобутки з 2016 року, які спостерігатимуться і в майбутньому. За період 2016–2023 роки додатковий чистий прибуток від відновлення запасів оцінений на рівні 6,67 млрд. грн., а в подальшому за період 2025–2035 роки збільшиться ще в межах на 21–28,3 млрд. грн.

Для досягнення аналогічних додаткових видобутків газу шляхом буріння проектних свердловин АТ «Укргазвидобування» було б змушене додатково витратити 17,3 млрд. грн. із терміном окупності близько 7 років, пробуривши 188 свердловин.

Таким чином, врахування об'ємів відновлення запасів газу на родовищах пізньої стадії експлуатації заслуговує уваги і дасть можливість оптимізувати буріння свердловин та видобуток газу, та направити кошти на пошуки та розвідку нових нафтогазових родовищ.

Крім Шебелинського ГКР рекомендуємо провести спеціальні дослідження для Хрещищенської групи родовищ з аналогічними геолого-промисловими умовами.

Література

1. Рудько Г. І., Бондар О. І., Ловинюков В. І. та ін. Енергетичні ресурси геологічного середовища України (стан та перспективи) : у 2 т. Т. 1 / за ред. Г. І. Рудька ; Держ. коміс. України по запасах корис. копалин. Київ : БукРек, 2014. 525 с.
2. Вдовиченко А. І., Коваль А. М., Чепіль П. М. Проблеми нарощування запасів і видобутку нафти і газу в Україні за рахунок їх відновлення. *Нафта і газ. Наука Освіта – Виробництво: шляхи інтеграції та інноваційного розвитку* : матеріали. Всеукр. наук.-техн. конф., м. Дрогобич, 10–11 березня 2016 р.. Дрогобич : Трек-ЛТД, 2016. 174 с.
3. Лукін О. Ю. Забезпечення України власним природним газом: проблемні аспекти : за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України, 2 липня 2014 року. *Вісник НАН України*. 2014. № 9. С. 16–22.
4. Фесенко Ю. Л., Волосник Є. О., Фик І. М. Стан і перспективи розробки Шебелинського газоконденсатного родовища. *Нафтова і газова промисловість*. 2009. № 5–6. С. 24–28.
5. Абеленцев В. М., Лур'є А. Й., Міщенко Л. О. Геологічні умови вилучення залишкових запасів і дорозвідки родовищ вуглеводнів північної прибортової зони Дніпровсько-Донецької западини : монографія. Харків : ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2014. 192 с.
6. Кривуля С. В. Критерії дорозвідки великих родовищ вуглеводнів у нижньопермсько-верхньокам'яно вугільних покладів Дніпровсько-Донецької западини : дис. канд. геолог. наук: 04.00.17. Харків, 2013. 207 с.
7. Суярко В. Г. Прогнозування, пошук та розвідка родовищ вуглеводнів. Харків : Фоліо, 2015. 413 с.
8. Фик І. М. Відновлення запасів на Шебелинському газоконденсатному родовищі. *Геологія нафти і газу* : матеріали Всеукр. наук.-практ. конф. студентів та аспірантів, м. Харків, 19–20 квітня 2018 р. / голова редколегії В. А. Пересадько. Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2018. С. 27–30.

9. Ментух І. О. Геологічні основи перспективи розробки Шебелинського родовища. *Геологія нафти і газу* : матеріали міжвузівської наук.-практ. конф. студентів та аспірантів, м. Харків, 16–17 травня 2017 р. Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2017. 98 с.
10. Фик І. М., Римчук Д. В. Вплив природних факторів підтримування пластового тиску на пізній стадії розробки газоконденсатних родовищ. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія* : зб. наук. пр. Харків : НТУ "ХПІ", 2024. № 1 (11). С. 63–68.
11. Постанова Кабінету міністрів України «Про затвердження Положення про покладення спеціальних обов'язків на суб'єктів ринку природного газу для забезпечення загальносуспільних інтересів у процесі функціонування ринку природного газу щодо особливостей постачання природного газу виробникам теплової енергії та бюджетним установам» від 19 липня 2022 р. № 812.
12. Податковий кодекс України, затверджений 2 грудня 2010 року № 2755-VI.
13. Лучко М. Р., Жукевич С. М., Фаріон А. І. Фінансовий аналіз : навч. посіб. Тернопіль : ТНЕУ, 2016. 304 с.

Bibliography (transliterated)

1. Rudko H. I., Bondar O. I., Lovyniukov V. I. et al. (2014). Enerhetychni resursy heolohichnoho seredovyscha Ukrainy (stan ta perspektyvy). H. I. Rudka (Ed.). Derzh. komis. Ukrainy po zapasakh korys. kopalyn. (Vol. 1). Kyiv: BukRek. 525 p.
2. Vdovychenko A. I., Koval A. M., Chepil P. M. (2016). Problemy naroshchuvannya zapasiv i vydobutku nafty i hazu v Ukraini za rakhunok yikh vidnovlennia. *Nafta i haz. Nauka Osvita – Vyrobnystvo: shliakhy intehtatsii ta innovatsiinoho rozvytku*: materialy. Vseukr. nauk.-tekhn. konf., m. Drohobych, 10–11 bereznia 2016 r. Drohobych: Trek-LTD. 174 p.
3. Lukin O. Yu. (2014). Zabezpechennia Ukrainy vlasnym pryrodnyim hazom: problemni aspekty : za materialamy naukovoi dopovidi na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy, 2 lypnia 2014 roku. *Visnyk NAN Ukrainy*, 9, 16–22.
4. Fesenko Yu. L., Volosnyk Ye. O., Fyk I. M. (2009). Stan i perspektyvy rozrobky Shebelynskoho hazokondensatnoho rodovyscha. *Naftova i hazova promyslovist*, 5–6, 24–28.
5. Abielientsev V. M., Lurie A. Y., Mishchenko L. O. (2014). Heolohichni umovy vyluchennia zalyshkovykh zapasiv i dorozvidky rodovysch vuhlevodniv pivnichnoi prybortovoi zony Dniprovsko-Donetskoi zapadyny : monohrafiia. Kharkiv: KhNU imeni V.N. Karazina. 192 p.
6. Kryvulia S. V. (2013). Kryterii dorozvidky velykykh rodovysch vuhlevodniv u nyzhnopermsko-verkhokamiano vuhilnykh pokladiv Dniprovsko-Donetskoi zapadyny: dys. kand. heo-loh. nauk: 04.00.17. Kharkiv. 207 p.
7. Suiarko V. H. (2015). Prohnozuvannia, poshuk ta rozvidka rodovysch vuhlevodniv. Kharkiv: Folio. 413 p.
8. Fyk I. M. (2018). Vidnovlennia zapasiv na Shebelynskomu hazokondensatnomu rodovyschi. *Heolohiia nafty i hazu*: materialy Vseukr. nauk.-prakt. konf. studentiv ta aspirantiv, m. Khar-kiv, 19–20 kvitnia 2018 r. (pp. 27–30). Kharkiv: KhNU im. V. N. Karazina.

9. Mentukh I. O. (2017). Heolohichni osnovy perspektyvy rozrobky Shebelynskoho rodovyshcha. *Heolohiia nafty i hazu : materialy mizhvuzivskoi nauk.-prakt. konf. studentiv ta aspirantiv*, Kharkiv, 16–17 travnia 2017. (p. 98). Kharkiv: KhNU im. V. N. Karazina.

10. Fyk I. M., Rymchuk D. V. (2024). Vplyv pryrodnykh faktoriv pidtrymuvannia plastovoho tysku na piznii stadii rozrobky hazokondensatnykh rodovyshch. *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu "Kharkivskiy politekhnichnyi instytut". Seriya: Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia*: zb. nauk. pr. Kharkiv: NTU "KhPI", 1 (11), 63–68.

11. Postanova Kabinetu ministriv Ukrainy «Pro zatverdzhennia Polozhennia pro pokladennia spetsialnykh oboviazkiv na subiektiv rynku pryrodnoho hazu dlia zabezpechennia zahalno-suspilnykh interesiv u protsesi funktsionuvannia rynku pryrodnoho hazu shchodo osoblyvostei postachannia pryrodnoho hazu vyrobnykam teplovoi enerhii ta biudzhetnym ustanovam» vid 19 lypnia 2022 r. № 812.

12. Podatkovi kodeks Ukrainy, zatverdzheny 2 hrudnia 2010 roku № 2755-VI.

13. Luchko M. R., Zhukevych S. M., Farion A. I. (2016). Finansovi analiz: navch. posib. Ternopil: TNEU. 304 p.

УДК 622.276.64; 622.245.54

І. М. Фик, С. В. Кривуля

ЩОДО ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ ВІД ВІДНОВЛЕННЯ ЗАПАСІВ ГАЗУ НА ПРИКЛАДІ ШЕБЕЛИНСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

Об'єктом дослідження є економічні показники розробки Шебелинського газоконденсатного родовища в умовах відновлення запасів газу за рахунок їх перетоків з глибоких горизонтів.

Однак, слід зауважити, що в наведених роботах та інших ніхто із авторів не розглядав питання економічної ефективності від відновлення запасів газу в родовищах на пізній стадії експлуатації. В роботі наведені фактичні (з урахуванням перетоків) та прогностичні дані показників розробки Шебелинського ГКР без урахування відновлення запасів. Показано додатковий видобуток газу за рахунок відновлення запасів в періоді 2016–2023 рр. склав 1.906 млрд. м³ та 2025–2035 рр. складе 7.960 млрд. м³.

При цьому додатковий чистий прибуток за період 2016–2023 рр. склав 6.672 млрд. грн. Додатковий прогностичний чистий прибуток за період 2025–2035 рр. складе 28.279 млрд. грн.

В тексті статті наведена формула розрахунку грошового потоку, який залежить від чистого прибутку, амортизаційних нарахувань та капітальних вкладень.

Показаний розрахунок кількості проектних свердловин, які треба би було пробурити для видобування об'ємів газу аналогічних прогностичним об'ємам додаткового видобутку газу за рахунок відновлення запасів. Кількість таких свердловин складає 188 одиниць.

Для досягнення аналогічних додаткових видобутків газу, шляхом буріння проектних свердловин АТ «Укргазвидобування» було б змушене додатково витратити 17,3 млрд. грн. із терміном окупності близько 7 років.

Таким чином врахування об'ємів відновлення запасів газу на родовищах пізньої стадії експлуатації заслуговує уваги, так як дає змогу оптимізувати, як буріння свердловин так і видобуток газу.

Рекомендується провести аналогічні дослідження по всім родовищам Шебелинсько-Хрещищенської групи з метою визначення перспектив їх довгострокової розробки.

Ключові слова: родовище, пластовий тиск, обводнення, розробка, пружність, колектор.

I. M. Fyk, S. V. Kryvulya

ON THE ECONOMIC EFFECT OF GAS RESERVES RECOVERY ON THE EXAMPLE OF SHEBELINKA GAS CONDENSATE FIELD

The subject of the study is the economic indicators of the development of the Shebelinskoye gas condensate field under conditions of recovery of gas reserves due to their flows from deep horizons.

However, it should be noted that in these works and others, none of the authors considered the issue of economic efficiency from the restoration of gas reserves in fields at a late stage of operation. The paper presents the actual (taking into account flows) and forecast data of Shebelinska GKR development indicators without taking into account reserves recovery. Additional gas production is shown due to the restoration of reserves in the periods 2016–2023 amounted to 1.906 billion m³ and 2025–2035 will amount to 7.960 billion m³.

At the same time, additional net profit for the period 2016–2023 amounted to 6.672 billion UAH. Additional forecast net income for the period 2025–2035 will amount to UAH 28.279 billion.

The text of the article provides a formula for calculating cash flow, which depends on net profit, depreciation charges and capital investments.

The calculation of the number of planned wells that would have to be drilled to produce gas volumes similar to the forecast volumes of additional gas production by restoring reserves is shown. The number of such wells is 188 units.

To achieve similar additional gas production, by drilling design wells JSC "Ukrigasvydobuvannya" would be forced to spend an additional 17.3 billion UAH. with a payback period of about 7 years.

Thus, taking into account the volume of recovery of gas reserves in late-stage fields deserves attention, as it makes it possible to optimize both drilling and gas production.

It is recommended to conduct similar studies on all fields of the Shebelinsko-Krestishchensky group in order to determine the prospects for their long-term development.

Keywords: field, reservoir pressure, waterlogging, development, elasticity, reservoir.

А. О. Шкоп, канд. техн. наук, докторант, О. В. Шестопапов, канд. техн. наук, доцент, Н. Г. Пономарьова, канд. техн. наук, доцент, А. С. Босюк, д-р філософії, старший викладач, Д. І. Нечипоренко, канд. техн. наук, доцент, Д. М. Войтенко, аспірант

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ ШЛАМІВ МОКРОЇ ГАЗООЧИСТКИ ВИКИДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Вступ. Металургійні підприємства є одним із головних джерел забруднення атмосферного повітря, зокрема через викиди пилогазових сумішей, що утворюються в процесі виробництва феросплавів [1–3]. У плавильних цехах феросплавного заводу застосовуються різні технології очищення викидів, зокрема мокра та суха газоочистка [4].

Склад шламів газоочищення залежить від складу доменних газів, який в свою чергу залежить від шихтових матеріалів, що містять залізовмісні брикети, кварцити, вапно, деревну щепу, кокс, кам'яне вугілля та електродну масу. У результаті мокрої очищення газів утворюються шламові води з температурою $+50...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$, які надходять у водно-шламову систему (ВШС) підприємства і потребують очищення від завислих часток.

Накопичення шламових вод після мокрої очистки димових газів потребує належної технологічної та екологічної обробки, оскільки вони містять дрібнодисперсні тверді частинки, залишки важких металів, кремнезем, оксиди марганцю та інші сполуки, які можуть становити загрозу для довкілля та здоров'я населення у разі їх потрапляння у водні об'єкти або ґрунт. Особливу увагу заслуговує проблема утворення щільних осадів у трубопроводах водно-шламової системи, що ускладнює експлуатацію обладнання, знижує ефективність очищення й може призвести до аварійних ситуацій.

Попри широке застосування мокрої газоочистки на вітчизняних металургійних підприємствах, питання ефективного управління шламовими водами та утвореними осадами залишається недостатньо вирішеним. Відсутність комплексного підходу до переробки або безпечного видалення шламів, що накопичуються у водно-шламових системах, сприяє підвищенню екологічного навантаження на навколишнє природне середовище, зокрема на водні ресурси та ґрунти. Необхідність мінімізації обсягів утворення шламів, покращення якості очищення викидів та запобігання вторинному забрудненню зумовлює актуальність подальших досліджень у цьому напрямі.

Актуальність роботи зумовлена потребою удосконалення технологій очистки шламів та оптимізації функціонування водно-шламових систем для зменшення негативного впливу виробництва на навколишнє середовище. Запровадження сучасних підходів до очищення та утилізації шламів сприятиме зниженню техногенного навантаження, покращенню екологічної безпеки виробництва та підвищенню його сталості у межах вимог сучасного природоохоронного законодавства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У вітчизняній науковій літературі питання знешкодження та утилізації шламів, що утворюються після мокрої очистки промислових викидів, розглядаються у працях таких дослідників, як Білецька Е.М., Онул Н.М., Ніконенко В.І., які аналізують екологічну небезпеку металургійних підприємств як джерела забруднення довкілля та ризику

для здоров'я населення [1], Фещенко О.Л. та Каменева Н.В., які оцінюють екологічні наслідки діяльності металургійних об'єктів в Україні [2], а також Нікітюк О.О., який підкреслює системний вплив металургійного виробництва на екологічну безпеку країни [3].

Шлами газоочистки містять дрібнодисперсні частки пилу металів, сажі і інших нерозчинних речовин [4]. Для очищення стічних вод, в тому числі шламів мокрої очистки газів, з метою їх вторинного використання в системах газоочистки використовують відстоювання з обробкою коагулянтами або флокулянтами. Процеси флокуляції й коагуляції при очищенні води детально проаналізовано у роботах [5–8], де окреслено умови ефективного осадження завислих часток за допомогою агрегатоутворюючих реагентів. Зазначено, що характеристики та особливості процесу флокуляції, включаючи розмір і структуру флокулянтів, вологоутримуючу здатність осаду та вміст вологи залежать від різних факторів, таких як склад твердої фази шламу, заряд та молекулярна маса флокулянтів, структура полімеру, дозування полімеру, жорсткість води, рН суспензії тощо.

У попередніх дослідженнях, встановлено особливості процесів очищення стічних вод, забрудненим пилом після процесів лиття як в металургійній промисловості [9, 10], так і на машинобудівних підприємствах [11]. Встановлено, що концентрація твердої фази впливає на швидкість осадження флокул, а гідромеханічний вплив на агрегати має руйнівний ефект, ступінь якого залежить від концентрації твердої фази [12]. Зокрема, збільшення швидкості руху рідини призводить до більшого пошкодження флокул, ніж збільшення часу менш інтенсивного впливу. Способом мінімізації руйнівного впливу на флокули може бути зниження швидкості транспортування суспензії внаслідок зниження продуктивності установки або збільшення поперечного перерізу каналу (трубопроводу). Ефективним способом очищення стічних вод від тонкодисперсних часток, в тому числі і шламів систем газоочищення металургійних підприємств можуть бути модульні установки, які містять устаткування для підготовки шламів до ефективної агрегації та зневоднюючі центрифуги [13]. У статті [14] було підкреслено важливість гідродинаміки та турбулентності потоку як основних рушійних сил процесу агрегації часток, що потребує проведення досліджень способів введення та змішування флокулянтів.

Разом з тим, більшість досліджень мають загальнотеоретичний характер і не враховують особливості функціонування конкретних водно-шламових систем великих металургійних підприємств. Це визначає необхідність поглибленого аналізу реального технічного стану та розробки практичних рекомендацій щодо вдосконалення систем очищення та поводження з шламами.

Мета і задачі дослідження

Мета даного дослідження полягає у визначенні ефективності схем очищення та зневоднення шламів мокрого газоочищення. Це потрібно для удосконалення роботи та підвищення ефективності модуля очищення шламових вод від завислих часток з метою вторинного використання освітленої води у системах газоочищення та зневоднення осаду.

Для досягнення зазначеної мети потрібно було вирішити наступні задачі:

- провести дослідження седиментаційних властивостей шламів мокрого газоочищення в промислових;
- визначити ефективність роботи очисного та зневоднюючого устаткування в залежності від особливостей введення флокулянту і шламу;

– запропонувати схему удосконалення очищення стічних вод апаратів мокрого газоочищення у водно-шламовій схемі виробництва феросплавів.

Методика дослідження. Дослідження проводилось на одному з підприємств Запорізької області з використанням натурних досліджень модуля (технологічного ланцюга апаратів) очищення та зневоднення шламів газоочищення. Модуль, який складався із змішуючи пристроїв, станції приготування флокулянтів та осаджувальної центрифуги (рис. 1), налаштовувався безпосередньо під час проведення промислових досліджень за наступними етапами дослідження.



Рисунок 1 – Характеристика модуля очищення та зневоднення шламових вод під час промислових випробувань в цеху металургійного підприємства (ТОВ «НТЦ «Екомаш», Україна)

1 етап промислових досліджень. Перевірена можливість очищення шламів цеху виробництва феросплавів, узятих перед радіальним згущувачем, з введенням катіонного флокулянту ТФК-18 двома порціями в потік з подальшим очищенням шламових вод і зневодненням шламів на центрифугі. Випробування проведені за схемою наведеною на рис. 2.

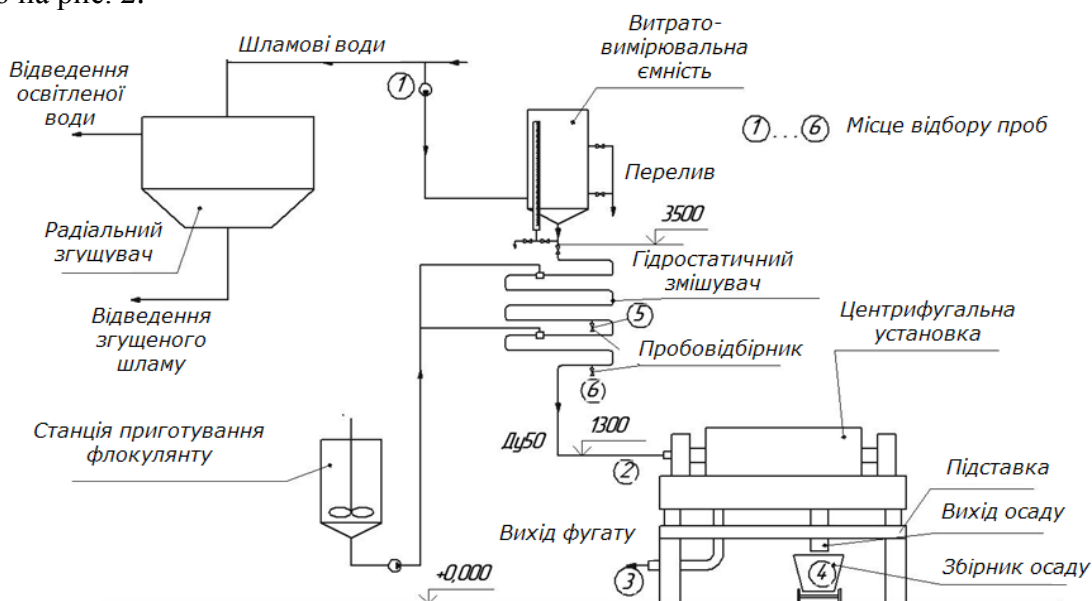


Рисунок 2 – Технологічна схема промислових випробувань на етапі 1

Згідно схеми шламові води газоочистки цеху феросплавів взяті безпосередньо перед радіальним згущувачем та подані насосом у витратно-вимірну ємність, з якої самопливом через гідростатичний змішувач (змійовик) поступають на зневоднення в центрифугальну установку. У потік шламових вод змішувача в дві крапки поданий розчин флокулянту.

2 етап промислових досліджень. Перевірена можливість очищення шламів, узятих перед радіальним згущувачем, з флокулюванням катіонним флокулянт ТФК-18 або Aquator-PC5045 у одну крапку «під мішалку», осадженням шламів в ємності з отриманням прозорого зливу (імітація відстійника) і подальшого зневоднення шламів на центрифугі за схемою, що зображена на рис. 3.

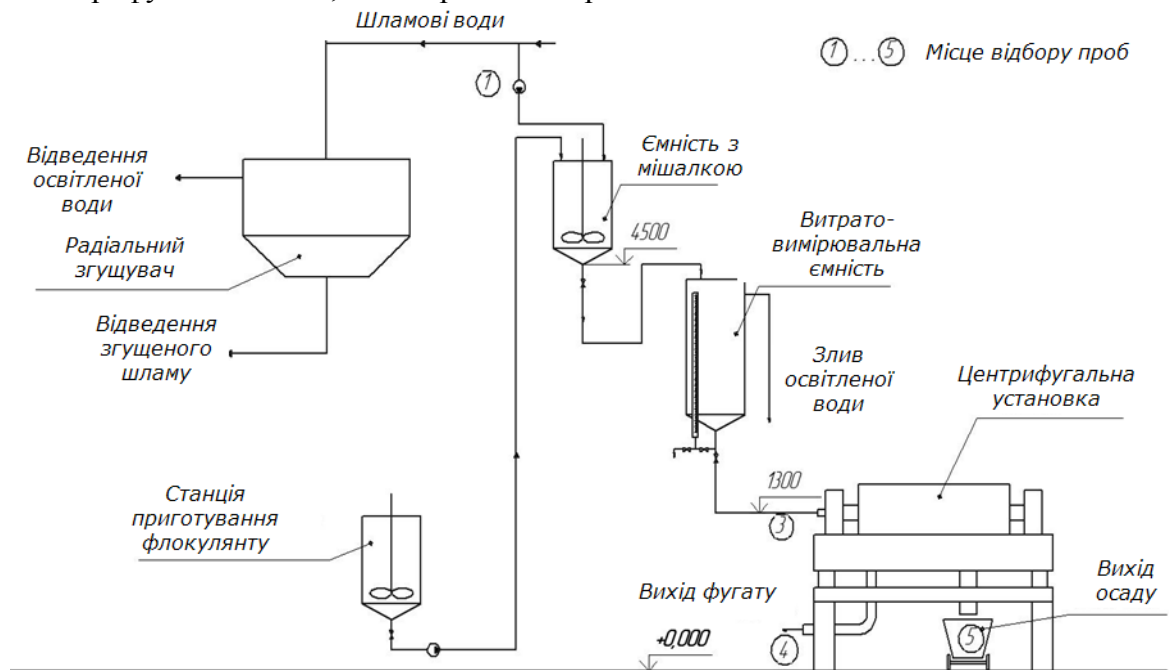


Рисунок 3 – Технологічна схема промислових випробувань на етапі 2

Згідно схеми шламові води газоочистки насосом подавались в ємність з мішалкою. У цю ж ємність подавався розчин флокулянту. Шламові води змішані з флокулянт самопливом поступають у витратно-вимірну ємність при закритому нижньому зливі, в якій відбувається відстоювання шламу. Прозорий продукт самопливом зливався через перелив місткості. Осаджені завислі речовини накопичуються на дні місткості. Після заповнення місткості згущеним шламом подача живлення і флокулянта припинялась, нижній злив відкривався і шлам самопливом направлявся на зневоднення в центрифугальну установку.

3 етап промислових досліджень. Для підбору резервного флокулянту були проведені порівняльні випробування з катіонними флокулянтами Aquator-PC5045 або ТФК-7 в дві крапки в потік з подальшим очищенням шламових вод в центрифугі за схемою, наведеною на рис. 2.

4 етап промислових досліджень. Перевірена можливість очищення суміші шламів при змішуванні живлення радіального згущувача та його згущеного шламу у

різних пропорціях (концентрації завислих речовин суміші складала від 10 до 30 г/л) з введенням флокулянту в одну крапку під мішалку з подальшим зневодненням у центрифугу за схемою на рис. 4.

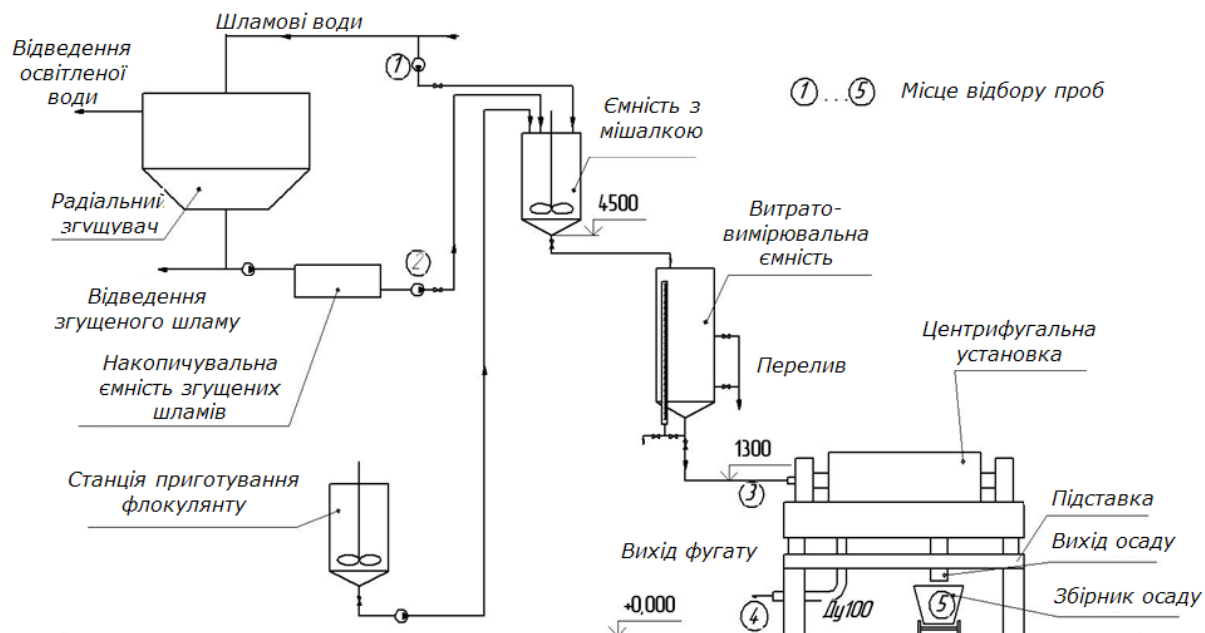


Рисунок 4 – Технологічна схема промислових випробувань на етапі 4

Згідно схеми згущені у радіальному згущувачі шлами насосом подавали в накопичувальну ємність, з якої їх перекачували в ємність з мішалкою. У цю ж ємність подавався розчин флокулянту. Співвідношення (витрати) шламових вод і згущених шламів регулювалися ручними засувками для отримання необхідної концентрації завислих речовин. Шламові води, змішані з флокулянтом самотпливом поступали у витратно-вимірвальну ємність, а потім на зневоднення у центрифугу.

Результати аналізу діючої водно-шламової схеми очищення шламів газоочищення

На досліджуваному підприємстві продукти горіння плавильних цехів піддаються сухій і мокрій очистці. Від цехів виробництва феросплавів та феросиліцію шламові води мокрої газоочистки самотпливом поступають у радіальний згущувач, перед яким змішуються в розподільному колодязі. У точці змішення потоків вводиться розчин катіонного флокулянта з концентрацією 0,025–0,05 %. Далі потік шламових вод по похилому трубопроводу поступає в завантажувальний пристрій радіального згущувача.

Радіальний згущувач виконаний у вигляді циліндрової чаші з конічним днищем (рис. 5) об'ємом 1500 м³. Надходження шламових вод і відведення освітленого продукту проводиться безперервно. Відкачування згущеного продукту проводиться в періодичному режимі згідно циклу роботи камерних фільтр-пресів, які його зневоднюють.

Освітлена вода (злив радіального згущувача) самотпливом поступає на вхід насосів які перекачують освітлену воду в градирню на охолодження. Після градирні освітлена вода та охолоджена вода подається на апарати мокрої газоочистки підходящих з цехів газів. Згущений осад відцентровим насосом ГШН-150-30 подається в цех зневоднення. Зневоднений продукт фільтр-пресів вивантажується в думпкери (вагони), які

вивозять тверді відходи на полігон для поховання. Надлишок згущеного шламу (близько 30 тон на добу) вивозяться цистернами на полігон рідких відходів.

В результаті схеми було виявлено, що при існуючому виробничому навантаженні має місце небаланс виділення шламів і їх зневоднення через недостатню продуктивність існуючого зневоднюючого устаткування – фільтр-пресів, що потребує додаткових зневоднюючих пристроїв. Збільшення потужностей із зневоднення шламів призведе до зменшення кількості рідких відходів, які вивозяться у вигляді шламу, а також втрати води з цими відходами.

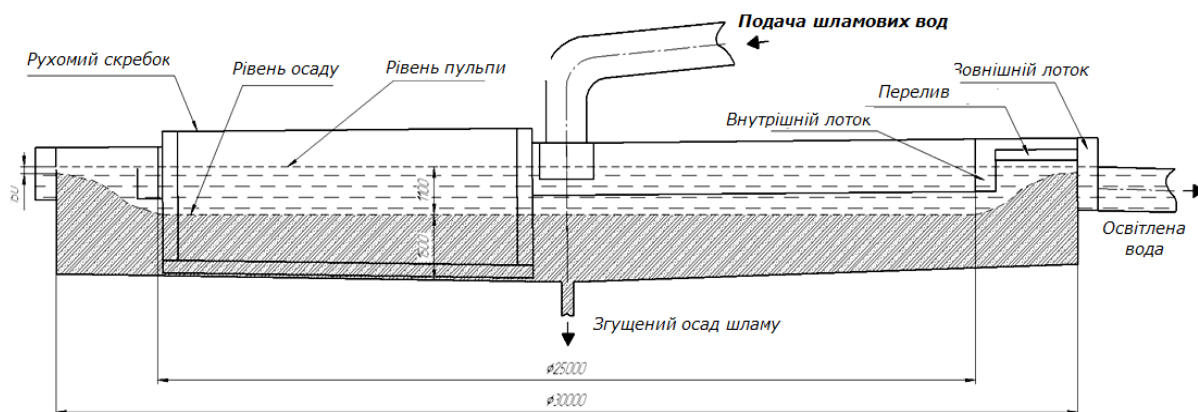


Рисунок 5 – Схема радіального згущувача

Седиментаційний аналіз виробничих шламів. В процесі промислових дослідів оцінювалась кінетика осідання проб шламу безпосередньо із виробничих цехів до їх потрапляння у радіальний згущувач: шламові води цеху виробництва феромарганцевих сплавів (проба 1); шламові води цеху виробництва феросиліцію (проба 2); шламові води безпосередньо перед радіальним згущувачем (проба 3), які є сумішшю шламів проб 1 і 2. Результати кінетики осадження проб 1, 2, 3 наведені в таблицях 1 та 2, а також рис. 6.

Таблиця 1 – Порівняння швидкості осадження зважених речовин в пробах

Час, хви- лин	Проба 1		Проба 2		Проба 3	
	Швидкість осідання часток, мм/с	Розмір часток, мкм	Швидкість осідання часток, мм/с	Розмір часток, мкм	Швидкість осідання часток, мм/с	Розмір часток, мкм
1	4,2	100...40	-	60...40	-	60...40
2	2,1		2,1		2,1	
5	0,84	40...14	0,84	40...14	0,84	40...14
10	0,42		0,42		0,42	
20	0,21		0,21		0,21	
30	0,14		0,14		0,14	
60	0,07	14...5	0,07	14...5	0,07	14...5
120	0,035		0,035		0,035	

Виконаний візуальний аналіз кінетики осідання часток, наведений на рис. 6, дозволяє використовувати набір технологічних тестів для приблизного візуального оперативного аналізу якості флокуляції та визначення вмісту завислих часток твердої фази у живленні та у фугаті.

Таблиця 2 – Вихід завислих часток за результатами седиментаційного аналізу

№ п/п	Клас, мкм	Проба 1		Проба 2		Проба 3	
		Вихід, г	Вихід, %	Вихід, г	Вихід, %	Вихід, г	Вихід, %
1	більше 40	1,85	80	0,8	60	0,25	30
2	40...14	0,15	9	0,35	25	0,15	25
3	14...5	0,05	3	0,05	5	0,1	5
4	менше 5	0,2	12	0,2	10	0,25	30

Аналіз результатів дослідження свідчить, що шлами проб 2 та 3 містять дрібно-дисперсні завислі частки 40–60 % часток менше 40 мкм, які повільно осідають і до 30 % часток менше 5 мкм, що потребує ефективної флокуляції шламів перед відстоюванням з урахуванням особливостей агрегатоутворення дрібнодисперсних часток.

Аналіз результатів відстоювання проб шламів показав, що швидкість їх відстоювання у зразках 1 та 2 вища, ніж у суміші шламів, що свідчить про можливість стабілізації дисперсної системи внаслідок утворення колоїдних часток і хімічної взаємодії. Такі спостереження дозволяють рекомендувати роздільне очищення шламів мокрого газоочищення викидів від різних цехів, які можуть мати різний хімічний склад як твердої, так і рідкої фаз.

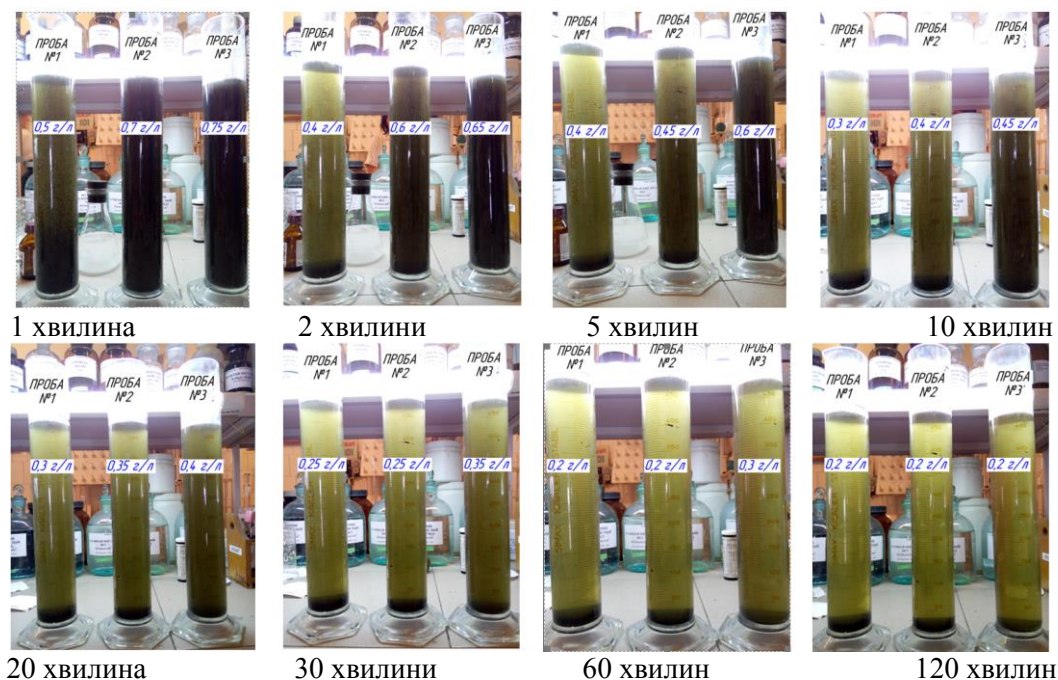


Рисунок 6 – Фотографії кінетики осідання твердої фази виробничих шламів

Результати випробувань Модуля очищення шламових вод і зневоднення шламів. Результати промислових випробувань способів змішення шламів з флокулянтами під час очищення і зневоднення шламів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Результати промислових випробувань очищення та зневоднення шламів газоочищення

Марка флокулянта	Режим роботи			Навантаження			Технологічні параметри	
	Частота обертання ротора, об/хв	Відносні оберти шнеку, об/хв	Потужність живлення (м ³ /годину)	Концентрація твердої фази у живленні, г/л	Витрата флокулянта, г/т	Кількість твердої фази у живленні, кг/час	Фугат	Кек
	N _{рот}	ΔN _{шн}	Q _ж	C _ж	G _ф	T	Концентрація твердої фази, г/л C _ф	Вологість, % W
Етап 1 (рис. 2)								
ТФК-18	2450	10	5,2	3,927	2204	20,42	0,163	50,25
ТФК-18	2450	4	6,6	3,914	1742	25,823	0,67	51,2
ТФК-18	2450	4	4,5	1,306	1276	5,877	0,348	39,49
ТФК-18	2200	4	5,20	3,692	4469	19,198	0,162	52,02
ТФК-18	2200	8	5,20	3,692	4469	19,198	0,199	52,5
ТФК-18	2680	4	5,20	3,126	4429	16,255	0,211	39,81
ТФК-18	2680	13	5,20	3,126	4429	16,255	0,204	50,27
ТФК-18	3000	4	5,20	3,126	4429	16,255	0,192	49,82
ТФК-18	3200	4	5,20	2,553	4972	13,276	0,211	48,68
Етап 2 (рис. 3)								
ТФК-18	2450	4	4,5	12,022	2540	54,1	4,138	47,6
РС5045	2450	4	6,3	34,419	1470	154,9	1,214	49,6
Етап 3 (рис. 2)								
ТФК-7	2450	4	3,27	3,235	1418	10,58	0,519	49,4
ТФК-7	2450	4	3,27	2,705	1187	8,85	0,587	46,9
ТФК-7	2450	4	3,27	2,775	1157	9,07	0,573	49,8
ТФК-7	2450	4	3,27	3,074	895	10,05	0,758	49,7
РС5045	2450	4	3,27	3,263	843	10,67	0,581	51,6
Етап 4 (рис. 4)								
ТФК-7	2450	4	6,3	19,257	1236	121,32	4,006	49,1
РС5045	2450	4	6	12,891	1939	77,35	1,069	50,2

Аналіз таблиці 3 показав, що найефективніше зневоднення шламів досягається при використанні флокулянта ТФК-18 (вологість кеку до 39,5 %, концентрація твердої фази у фугаті до 0,162 г/л) за частоти обертання ротора 2450–2680 об/хв і помірної витрати реагенту (рис. 1). Флокулянт ТФК-7 також забезпечує стабільні результати (вологість кеку 46,9–49,8 %) при невисокій витраті. Найкращими за поєднанням ефективності та економічності є ТФК-18 і ТФК-7 при їх використанні відповідно до

схеми введення флокулянтів двома порціями у потік через гідростатичний змішувач відповідно до рис. 2. Збільшення відносних обертів шнеку та чистоти обертів ротору призводить до незначного підвищення вологості осаду внаслідок затримання тонких фракцій твердої фази, які мають більшу вологоутримуючу здатність.

Збільшення концентрації живлення центрифуги, яке імітувалось при дослідженні на етапах 2 та 4 свідчить про можливість досягнення вологості осаду центрифуги на рівні 50 %, але підвищення кількості твердої фази у фугаті до 1–4 г/л. При використанні такого ланцюгу апаратів фугат потребує доочищення або повинен повертатись у радіальний відстійник. Однак такий режим прийнятний для зневоднення згущених шламів даного виробництва та попередження вивозу рідких відходів на полігон.

В результаті проведених промислових експериментів було встановлено, що ефективна флокуляція і очищення шламів газоочистки, можлива при врахуванні основних чинників, що впливають на агрегатоутворення. Такими чинниками є концентрація твердої фази і її дисперсний склад, спосіб введення флокулянту (однією чи декілька ми порціями), спосіб змішення шламу з флокулянтами (гідростатичний чи за допомогою мішалки), температура шламу та інші фактори. Використання найбільш оптимальних умов флокуляції, очищення і зневоднення шламів дозволить знизити витрати дорогих флокулянтів, запобігти втратам води водооборотної системи і знизити об'єми і витрати на вивіз шламу.

На рис. 7 наведені фотографії відбору проб, фугату та осаду центрифуги, відібрані на етапі 1 за схемо досліджень, наведеною на рис. 2.

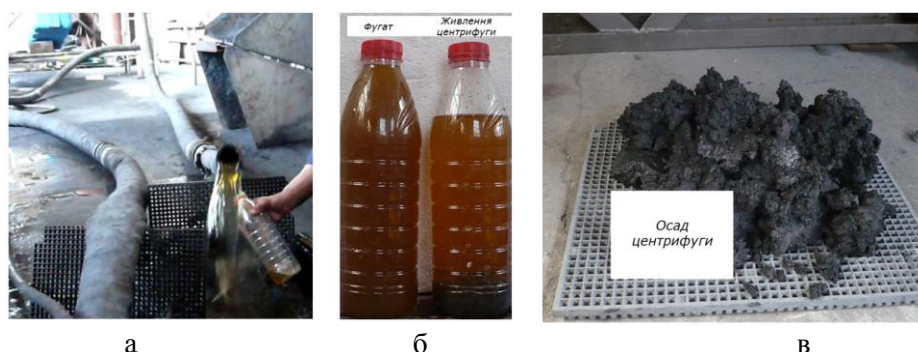


Рисунок 7 – Фотографії результатів очищення та зневоднення шламів:
а – відбір проб фугату; б – порівняння проб живлення центрифуги і фугату;
в – зневоднений осад

Для визначення можливості оптимізації процесу флокуляції складних за хімічним складом шламів необхідні додаткові дослідження чинників, що впливають на стійкість дисперсних систем, які можливо врахувати лише при дослідіх реальних виробничих шламів на конкретному підприємстві.

За результатами випробувань було запропоновано наступні схеми очищення шламових вод, які виключають існуючий небаланс потужностей діючого зневоднюючого устаткування (фільтр-пресів) та виключають вивоз рідкихшламі вна полігон.

Схема 1. В існуючій водно-шламовій схемі проводити частковий відбір згущеного продукту радіального згущувача, змішувати його з живленням і після введення додаткового флокулянта (флокуляція сфлокульованого в радіальному згущувачі шламу) в суміш в потоці подати на центрифуги.

Схема 2. Змінити водно-шламову схему шляхом окремої очистки стічних вод апаратів газоочистки різних цехів, наприклад, встановити додаткову системи очистки для

шламів цеху виробництва феросиліцію за схемою з отриманням фугату, який відповідає вимогам оборотної води виробництва із вмістом твердої фази менше 350 мг/л, а шлами цеху виробництва феромарганцевих сплавів очищати за існуючою на виробництві схемою.

Висновки

1. У результаті проведених промислових досліджень було встановлено технічну можливість задовільного очищення шламових вод, що утворюються внаслідок процесу мокрої газоочистки і характеризуються підвищеним вмістом дрібнодисперсних завислих часток ($\gamma_{40 \dots 60} = 30 \%$, $\gamma_{-14} = 45 \%$). За допомогою модернізованого обладнання – зокрема осаджувальних центрифуг типу ОГШ – вдалося досягти зниження концентрації завислих речовин менше 0,35 г/л, що свідчить про досягнення нормативних показників якості очищення. Ефективне зневоднення шламів до вологості $45 \pm 5 \%$ дозволяє зменшити обсяги утворення відходів, полегшити їх подальше транспортування, зберігання або утилізацію, а також знизити витрати на оброблення шламів.

2. Дослідження також дозволили визначити оптимальні умови для досягнення найбільш ефективного очищення шламових вод. Встановлено, що найвищі показники очищення забезпечуються при використанні флокулянтів типу ТФК-7 та ТФК-8, які проявляють високу ефективність у широкому діапазоні концентрацій і температур.

3. В результаті промислових випробувань різних схем очищення шламів та порівняння отриманих результатів встановлено, що ефективне агрегатоутворення підвищується при гідростатичному змішуванні в потоці та введенні флокулянтів у потік двома порціями. Це призводить до кращих механізмів двостадійності процесу утворення флокул: адсорбції флокулянту на поверхні часток при введенні першої порції, а потім при введенні наступної порції утворення полімерних містків і як наслідок – крупних флокул. Здійснення процесу в потоці попереджує руйнування флокул внаслідок механічного впливу лопатей перемішуючого пристрою. Отримані результати можуть бути використані для розробки регламентів очищення шламових вод і вдосконалення технологічних схем.

Література

1. Білецька Е. М., Онул Н. М., Ніконенко В. І. Металургійні підприємства як джерело забруднення атмосферного повітря та фактор ризику погіршення здоров'я населення. *Медичні перспективи*. 2018. Т. 23, № 3–1. С. 17–22.
2. Феценко О. Л., Каменева Н. В. Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід*. 2016. № 2. С. 28–32.
3. Нікітюк О. О. Вплив металургійного виробництва на екологічний стан країни. *Актуальні питання економіки, фінансів, обліку і права*. 2022. № 43.
4. Shomanova Z., Safarov R., Tashmukhambetova Z. et al. Complex research of ferroalloys production wastes by physical and chemical methods. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*. 2021. Vol. 56, Iss. 3. P. 629.
5. Khazaie A., Mazarji M., Samal B. et al. A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*. 2022. No. 14 (6). P. 918.
6. Que Nguyen Ho, Michael Fettweis, Kate L. Spencer, Byung Joon Lee. Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review. *Water Research*. 2022. Vol. 213, 118147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118147>

7. Hua W., Boqiang G., Jie R. et al. Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review. *Water Research*. 2018. No. 143. P. 608–631. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>.
8. Huanjun B., Xiangsong M., Meirong W., Wei S. A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*. 2025. No. 75, 107894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107894>.
9. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. Investigation of the treatment efficiency of fine-dispersed slime of a water rotation cycle of a metallurgical enterprise. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 5, No. 3 (37). P. 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112791>
10. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. Investigation of flocculation efficiency in treatment of wet gas treatment slime of ferroalloys production. *Technology Audit and Production Reserves*. 2017. Vol. 5, No. 3 (37). P. 29–39. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112792>.
11. Bosiuk A., Shkop A., Kulinich S. et al. Multi-component wastewater from finely dispersed impurities treatment intensification. *Ecological Questions*. 2024. Vol. 34, No. 4. P. 1–18. doi: <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.055>.
12. Shestopalov O., Briankin O., Tseitlin, M. et al. Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 5, No. 10 (101). P. 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300>.
13. Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N. et al. Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*. 2020. No. 3. P. 75–86. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001239>.
14. Oyegbile B., Ay P., Narra S. Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: a review. *Environmental Engineering Research*. 2016. Vol. 21, Iss. 1. P. 1–14. doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2015.086>.

Bibliography (transliterated)

1. Biletska E. M., Onul N. M., Nikonenko V. I. (2018). Metalurhiini pidpriemstva yak dzherelo zabrudnennia atmosferneho povitria ta faktor ryzyku pohirshennia zdorovia naselennia. *Medychni perspektyvy*, 23, 3/1, 17–22.
2. Feshchenko O. L., Kameneva N. V. (2016). Otsinka vplyvu diialnosti metalurhiinykh pidpriemstv na navkolyshnie pryrodne seredovyshche Ukrainy. *Investysii: praktyka ta dosvid*, 2, 28–32.
3. Nikitiuk O. O. (2022). Vplyv metalurhiinoho vyrobnytstva na ekolohichniy stan krainy. *Aktualni pytannia ekonomiky, finansiv, obliku i prava*, 43.
4. Shomanova Z., Safarov R., Tashmukhambetova Z., Sassykova L., Nosenko Y., Mukanova R. (2021). Complex research of ferroalloys production wastes by physical and chemical methods. *Journal of Chemical Technology & Metallurgy*, 56, 3, 629.
5. Khazaie A., Mazarji M., Samal B., Osborne D., Minkina T., Sushkova S., Soldatov A. (2022). A review on coagulation/flocculation in dewatering of coal slurry. *Water*, 14(6), 918.
6. Que Nguyen Ho, Fettweis M., Spencer K. L., Lee B. J. (2022). Flocculation with heterogeneous composition in water environments: A review. *Water Research*, 213, 118147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118147>.

7. Hua W., Boqiang G., Jie R., Aimin L., Hu Y. (2018). Coagulation/flocculation in dewatering of sludge: a review. *Water Research*, 143, 608–631. doi: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.07.029>.
8. Huanjun B., Xiangsong M., Meirong W., Wei S. (2025). A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 75, 107894. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107894>.
9. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. (2017). Investigation of the treatment efficiency of fine-dispersed slime of a water rotation cycle of a metallurgical enterprise. *Technology Audit and Production Reserves*, 5, 3(37), 22–29. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112791>.
10. Shkop A., Briankin O., Shestopalov O., Ponomareva N. (2017). Investigation of flocculation efficiency in treatment of wet gas treatment slime of ferroalloys production. *Technology Audit and Production Reserves*, 5, 3(37), 29–39. doi: <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.112792>.
11. Bosiuk A., Shkop A., Kulinich S., Samoilenko D., Shestopalov O., Tykhomyrova T. (2024). Multi-component wastewater from finely dispersed impurities treatment intensification. *Ecological Questions*, 34, 4, 1–18. doi: <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.055>.
12. Shestopalov O., Briankin O., Tseitlin M., Raiko V., Hetta O. (2019). Studying patterns in the flocculation of sludges from wet gas treatment in metallurgical production. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5, 10(101), 6–13. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181300>.
13. Shestopalov O., Briankin O., Rykusova N., Hetta O., Raiko V., Tseitlin M. (2020). Optimization of floccular cleaning and drainage of thin dispersed sludges. *EUREKA: Physics and Engineering*, 3, 75–86. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001239>.
14. Oyegbile B., Ay P., Narra S. (2016). Flocculation kinetics and hydrodynamic interactions in natural and engineered flow systems: a review. *Environmental Engineering Research*, 21(1), 1–14. doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2015.086>.

УДК 622.793:648.326

А. О. Шкоп, О. В. Шестопалов, Н. Г. Пономарьова, А. С. Босюк, Д. І. Нечипоренко,
Д. М. Войтенко

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ОЧИЩЕННЯ ТА ЗНЕВОДНЕННЯ ШЛАМІВ МОКРОЇ ГАЗООЧИСТКИ ВИКИДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ПІДПРИЄМСТВА

У дослідженні висвітлено результати комплексного аналізу ефективності очищення та зневоднення шламів, що утворюються внаслідок мокрої газоочистки викидів металургійного виробництва. Промислові випробування модернізованих осаджувальних центрифуг типу ОГШ засвідчили їх високу ефективність при очищенні шламових вод: концентрацію завислих речовин вдалося знизити до рівня менше 0,35 г/л. Це дає підстави стверджувати про технічну можливість досягнення нормативних показників якості очищення води у межах існуючих технологічних схем. Крім того, досягнуто ефективного зневоднення шламів до вологості 45 ± 5 %, що значно полегшує їх подальше транспортування, складування або утилізацію та зменшує витрати на оброблення. Встановлено, що зниження вологості в шламах також зменшує ризики вторинного забруднення навколишнього середовища та знижує загальне екологічне навантаження. Особливу увагу в дослідженні приділено оптимізації процесів флокуляції. Визначено,

що використання флокулянтів типу ТФК-7 і ТФК-8 забезпечує високі показники очищення в широкому діапазоні температур і концентрацій. Проведено порівняльну оцінку схем введення флокулянтів у потік шламової води. Найкращі результати досягнуто при використанні гідростатичного змішування та двоетапного введення флокулянту, що сприяє формуванню щільних і стійких флокул, які ефективно осідають у центрифугах. Отримані результати мають практичну значущість для металургійної галузі, оскільки можуть бути покладені в основу розробки регламентів очищення шламових вод, удосконалення технологічних схем водообігу, а також впровадження природоорієнтованих рішень на підприємствах з високим рівнем водоспоживання та водозабруднення. Рекомендовано впроваджувати результати дослідження як складову частину стратегії підвищення екологічної безпеки та сталого розвитку підприємств гірничо-металургійного комплексу. **Ключові слова:** шлами, очищення викидів, флокуляція, завислі частки, освітлення води, модуль очищення, осаджувальні центрифуги, екологічна безпека.

A. O. Shkop, O. V. Shestopalov, N. G. Ponomarova, A. S. Bosiuk, D. I. Nechyporenko,
D. M. Voitenko

ANALYSIS OF THE RESULTS OF CLEANING AND DEHYDRATION OF SLUDGE FROM WET GAS CLEANING OF METALLURGICAL ENTERPRISE EMISSIONS

The study highlights the results of a comprehensive analysis of the efficiency of sludge treatment and dewatering resulting from wet gas cleaning of metallurgical emissions. Industrial tests of the modernized OGSh-type sedimentation centrifuges have shown their high efficiency in sludge water treatment: the concentration of suspended solids was reduced to less than 0.35 g/l. This gives grounds to assert that it is technically possible to achieve the standard water treatment quality indicators within the existing technological schemes. In addition, effective dewatering of sludge to a moisture content of 45 ± 5 % was achieved, which greatly facilitates its further transportation, storage or utilization and reduces treatment costs. It has been established that reducing the moisture content in sludge also reduces the risks of secondary environmental pollution and reduces the overall environmental burden. Particular attention is paid to the optimization of flocculation processes. It has been determined that the use of flocculants such as TFC-7 and TFC-8 provides high purification rates in a wide range of temperatures and concentrations. A comparative assessment of the schemes for introducing flocculants into the sludge water flow was carried out. The best results were achieved when using hydrostatic mixing and two-stage flocculant introduction, which contributes to the formation of dense and stable flocs that effectively settle in centrifuges. The obtained results are of practical importance for the metallurgical industry, as they can be the basis for the development of regulations for sludge water treatment, improvement of technological water circulation schemes, as well as the implementation of environmentally friendly solutions at enterprises with high levels of water consumption and water pollution. It is recommended to implement the results of the study as an integral part of the strategy for improving environmental safety and sustainable development of mining and metallurgical enterprises.

Keywords: sludge, emission treatment, flocculation, suspended solids, water clarification, treatment module, sedimentation centrifuges, environmental safety.

І. Ш. Невлюдов¹, д-р техн. наук, професор, В. Є. Овчаренко¹, д-р техн. наук, професор,
О. В. Токарева¹, канд. техн. наук, професор, І. В. Гурін², канд. техн. наук

АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВВКМ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

¹ Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

² Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Харків

Ключові слова: автоматизація, технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка, діелектрична проникність, контроль, температура.

Кожному матеріалу притаманний унікальний набір електрофізичних характеристик, які значною мірою визначаються його діелектричними властивостями. Електричні параметри, як правило, описуються через електропровідність та діелектричну проникність. Електропровідність відображає здатність матеріалу проводити електричний струм і прямо пов'язана з його питомим електричним опором. Водночас діелектрична проникність характеризує рівень поляризації матеріалу у відповідь на прикладене змінне електричне поле і є одним із ключових параметрів, що впливають на електромагнітну, теплофізичну та електрохімічну поведінку матеріалу.

У сучасних умовах високотехнологічного виробництва, зокрема в умовах підвищених температур, електромагнітних навантажень або дії іонізуючого випромінювання, точне визначення діелектричних властивостей набуває особливої важливості. Аналіз цих параметрів є основою для моделювання функціональної поведінки матеріалів, розробки нових композитів, сенсорних елементів, енергетичних систем, мікроелектроніки та інших складних технічних пристроїв. Висока чутливість діелектричних характеристик до змін у структурі матеріалу, його фазовому складі, температурі та частоті дозволяє використовувати ці параметри як надійні індикатори стану речовини в процесі її виготовлення, експлуатації чи деградації [1].

Особливої актуальності контроль діелектричних характеристик набуває при виготовленні складних гетерогенних матеріалів, зокрема вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ), які характеризуються вираженою анізотропією, тобто залежністю фізичних властивостей від напрямку в просторі [2–4]. Така структурна анізотропія суттєво впливає на просторовий розподіл та абсолютні значення діелектричної проникності, що вимагає обов'язкового врахування при математичному моделюванні й практичному використанні цих матеріалів у складних електрофізичних умовах. Для опису частотної залежності діелектричної проникності $\epsilon(\omega)$ розроблено низку моделей та методів розрахунку, які відрізняються за рівнем складності, точності та сферою застосування. Вибір оптимального підходу визначається конкретною прикладною задачею, необхідною точністю та характером електрофізичних процесів у матеріалі.

Ефективне керування процесами термообробки та пиролізу вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів базується на автоматизації контролю критичних технологічних параметрів [5–7]. Одним з ключових інструментів для цього є вимірювання комплексної діелектричної проникності в режимі реального часу, що дозволяє контролювати

ти стан матеріалу на всіх етапах обробки. Ці параметри мають суттєвий вплив на мікроструктуру, щільність, пористість та механічні характеристики кінцевого виробу.

Метою даного дослідження є аналіз методів вимірювання та контролю комплексної діелектричної проникності вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів, виготовлених термоградієнтним методом. Особливу увагу приділено аналізу діелектричних характеристик матеріалів за допомогою високочастотних методів вимірювання та моделювання, зокрема на основі моделей Максвелла-Вагнера та Максвелла-Гарнетта. Розглянуто можливості поєднання індукційного нагріву, мікрохвильових зондів та цифрових систем керування для забезпечення точного регулювання параметрів технологічного процесу та покращення якості ВВКМ.

Комплексна діелектрична проникність $\varepsilon^*(\omega)$ є функцією частоти прикладеного електричного поля і розраховується за формулою [8]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega),$$

де $\varepsilon'(\omega)$ – дійсна частина, що характеризує здатність матеріалу до накопичення електричної енергії; $\varepsilon''(\omega)$ – уявна частина, яка пов'язана з тепловими втратами енергії в матеріалі.

Матеріали типу ВВКМ з напівпровідниковими властивостями характеризуються вираженою частотною та температурною залежністю діелектричної проникності. Зі зростанням частоти прикладеного електричного поля спостерігається зменшення дійсної частини діелектричної проникності ε' , а уявна частина ε'' демонструє максимум, що пов'язано з релаксаційними процесами, інтерфазною поляризацією (ефект Максвелла-Вагнера), а також із фазовими та структурними переходами в матеріалі.

На низьких частотах (до кількох кГц) значення ε^* є високим, що обумовлено накопиченням зарядів на міжфазних межах та активною поляризацією провідних частинок. Зі збільшенням частоти поляризаційні механізми вже не встигають реагувати на змінне поле, внаслідок чого ε' та ε'' зменшуються. У високочастотному діапазоні ВВКМ проявляють властивості ближчі до діелектриків, оскільки струмопровідні канали вже не активні на таких швидкостях. Температурний фактор також має суттєвий вплив: зі зростанням температури підвищується рухливість носіїв заряду, що призводить до збільшення значень ε'' через зростання втрат. Однак при надмірному нагріванні можливе порушення структури композиту, що проявляється деградацією провідної фази, зменшенням діелектричної проникності та появою нелінійних ефектів.

Діелектрична проникність ВВКМ змінюється як функція частоти прикладеного електричного поля, так і температури, що є особливо актуальним при термічній обробці, де відбувається формування структури за умов термоградієнта. У зв'язку з цим, для коректного контролю та аналізу параметрів у реальному часі необхідне застосування спеціалізованих моделей та методів вимірювання, які враховують динамічну змінність фізичних властивостей матеріалу в процесі обробки.

У випадку застосування термоградієнтного методу виготовлення ВВКМ, контроль діелектричних характеристик дозволяє відстежувати хід процесу графітизації, ступінь просочення, однорідність структури та виявляти потенційні дефекти. Саме тому методи діелектричної спектроскопії є ефективними засобами зворотного зв'язку у системах автоматизованого управління технологічними процесами. Аналіз температурної залежності дійсної ε' та уявної ε'' складових діелектричної проникності дає змогу

своєчасно виявляти зміни в структурі матеріалу та оперативно коригувати режими термічної обробки з метою досягнення необхідних фізико-хімічних характеристик готового виробу.

Одним із ключових технологічних параметрів є температурний градієнт, що безпосередньо впливає на спрямованість та інтенсивність росту структурних утворень. Високий градієнт температури сприяє формуванню впорядкованої, анізотропної структури з покращеними теплопровідними характеристиками, однак його надмірне збільшення здатне викликати внутрішні термонапруження та мікротріщини. Постійний контроль діелектричних характеристик дозволяє відслідковувати однорідність прогріву матеріалу та своєчасно коригувати температурне поле з метою запобігання локальним дефектам.

Максимальна температура є ще одним важливим параметром, що визначає рівень графітизації, пористість та електропровідність композиту. Для досягнення необхідного ступеня графітизації температура зазвичай становить 1600–2200 °C. Недостатній температурний рівень призводить до збереження аморфної структури, тоді як перевищення оптимального діапазону може викликати надмірну усадку або навіть деградацію структури. Зміни в мнимій складовій комплексної діелектричної проникності (ϵ'') вказують на стадії структурних перетворень, забезпечуючи можливість точного визначення завершення процесу графітизації та переходу до наступного етапу обробки.

Темпи нагріву та охолодження також потребують автоматизованого регулювання, оскільки надто швидкі температурні зміни можуть призводити до виникнення залишкових напружень та структурних дефектів. Повільне підвищення температури забезпечує рівномірну усадку та сприяє стабілізації внутрішньої структури, тоді як контроль діелектричних характеристик у реальному часі дозволяє оперативно ідентифікувати фазові переходи, що супроводжуються змінами поляризаційних механізмів у матеріалі. Це дає змогу коригувати профіль температури відповідно до поточного стану зразка, підвищуючи ефективність процесу.

Ще одним важливим технологічним параметром є тиск у зоні піролізу. Зазвичай обробка проводиться у вакуумі або в середовищі інертного газу (аргону або азоту), що дозволяє ефективно видаляти леткі продукти розкладу та покращувати просочення зв'язуючим. Зменшення тиску сприяє зниженню залишкової пористості й покращує якість заповнення пір. Діелектричний моніторинг змін структури під час піролізу дає змогу оцінити внутрішній розподіл газових включень і виявити ознаки неоднорідності, які не завжди можна зафіксувати іншими методами контролю.

Багатоцикловий режим пропитки та піролізу застосовується для поступового нагущування густини ВВКМ і зменшення їх пористості. Зазвичай для отримання високоякісного композиту необхідно пройти від 3 до 10 таких циклів. На кожному етапі контролюється насиченість композиту вуглецевим залишком та однорідність розподілу зв'язуючого. Використання методів діелектричної спектроскопії дозволяє фіксувати рівень заповнення пор, виявляти наявність залишкових дефектів та визначати момент досягнення оптимального ступеня насичення, тим самим мінімізуючи кількість зайвих циклів і підвищуючи економічність виробничого процесу.

Не менш важливою є характеристика зв'язуючого, його хімічна природа, в'язкість та здатність до карбонізації. Вибір конкретного типу смоли (зазвичай фенолформальдегідної або фуранової) здійснюється з урахуванням бажаного карбоновмісного залишку та глибини проникнення в пори композиту. Менш в'язкі зв'язуючі проникають краще, але демонструють нижчу вихідність вуглецю після піролізу. В процесі обробки зміни в діелектричних параметрах, зокрема у спектрі ϵ' та ϵ'' , можуть буди ін-

дикаторами рівня просочення, в'язкості смоли та її хімічної стабільності на кожному етапі нагріву. Це дає змогу не лише контролювати рівномірність заповнення, а й прогнозувати поведінку зв'язуючого при наступному термообробленні.

Таким чином, контроль діелектричних властивостей під час виготовлення ВВКМ є дієвим засобом впливу на основні технологічні параметри процесу. Завдяки цьому з'являється можливість у режимі реального часу гнучко налаштовувати температуру, тиск, швидкість нагрівання та параметри просочення, що позитивно позначається на стабільності, відтворюваності й кінцевій якості матеріалу. Діелектричні методи спостереження дають змогу глибше зрозуміти фізико-хімічні зміни усередині структури композицій і сприяють удосконаленню технологічних підходів до їх виготовлення [9–11]. Це особливо актуально для галузей, де висувуються підвищені вимоги до матеріалів, зокрема в авіації, космічній, енергетичній та оборонній промисловості.

Вибір методу вимірювання діелектричних характеристик матеріалу визначається, перш за все, вимогами до кінцевого виробу, частотним діапазоном дослідження, а також фізичними властивостями самого зразка. Одним із найпоширеніших методів для лабораторних досліджень є метод плоского конденсатора, який базується на визначенні ємності зразка, розміщеного між плоскими електродами, з використанням вимірювача типу LCR-метр. При цьому відносна діелектрична проникність (ε_r) зразка розраховується за формулою [12]:

$$\varepsilon_r = \frac{C \cdot d}{\varepsilon_0 \cdot A},$$

де C – виміряна ємність, Ф; d – товщина зразка, м; A – площа електродів, м²; ε_0 – електрична стала, яка приблизно дорівнює $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м.

Однак застосування цього методу для електропровідних композитів, зокрема таких як вуглець-вуглецеві композиційні матеріали, супроводжується рядом суттєвих обмежень. Основна проблема полягає в тому, що LCR-метри не призначені для вимірювання ємності провідних зразків, оскільки такі матеріали здатні коротко замикати вимірювальний контур. Щоб уникнути цього, між зразком і електродами зазвичай вводиться тонкий діелектричний прошарок, який виконує роль ізоляційної плівки. Такий підхід дозволяє знизити похибки, пов'язані з прямим електричним контактом, але водночас знижує точність через появу додаткової межі між фазами.

Серед основних обмежень застосування конденсаторного методу для визначення діелектричної проникності є його висока чутливість до структурної неоднорідності та анізотропії досліджуваного матеріалу. Вуглець-вуглецеві композиційні матеріали, як правило, характеризуються волокнистою спрямованою структурою, що зумовлює залежність результатів вимірювання від орієнтації зразка відносно площин електродів. Стандартні моделі базуються на припущенні ізотропності середовища, що не відповідає реальним умовам для композитів з анізотропною провідністю або структурою. У зв'язку з цим результати можуть втрачати достовірність або виявляти значні відхилення залежно від умов вимірювання.

Додатковим фактором, що впливає на точність методу, є необхідність суворого дотримання геометричних параметрів зразка. Зокрема, важливо забезпечити паралельність поверхонь, однорідність товщини та стабільність площі електродів. Навіть незначні відхилення у формі або шорсткості поверхні здатні призвести до спотворень у виміряній ємності, що ускладнює коректне обчислення діелектричних характеристик. У ви-

падках, коли зразок містить пори, тріщини чи інші дефекти, ці похибки можуть бути суттєвими.

Окремо слід зазначити значний вплив поверхневих витоків струму та струмів провідності, які можуть виникати внаслідок забруднення зразка, зміни вологості або недостатньої якості контактних електродів. Це особливо актуально для плівкових або тимчасових контактів, де стабільність електричного з'єднання не гарантована. Нерідко додаткові похибки спричиняються також високим контактним опором, ВВКМ часто мають пористу, шорстку або слабо провідну поверхню, що ускладнює забезпечення надійного електричного контакту з електродами. У таких умовах формально вимірювана ємність не відображає реальних електрофізичних властивостей зразка. Ще одним важливим аспектом є неможливість коректного врахування накопичення енергії в об'ємі зразка, що особливо суттєво при дослідженнях матеріалів з внутрішніми втратами або діелектричною дисперсією. У стандартній конфігурації метод обмежується визначенням інтегральної ємності без урахування розподілу поля всередині зразка.

Незважаючи на вказані обмеження, метод плоского конденсатора залишається корисним інструментом для попередньої оцінки діелектричних властивостей, зокрема при низькочастотних дослідженнях. Його доцільно застосовувати в умовах, коли наявна попередня інформація про електропровідність компонентів композиту, а також коли точність вимірювання не є критичною.

Дослідження діелектричних властивостей ВВКМ є актуальним у контексті моніторингу структурних змін під час їхнього виготовлення, зокрема в умовах термоградієнтної обробки та багатоступеневого просочення. На низьких частотах (50 Гц–1 МГц) найбільш придатними є методи, що враховують складну гетерогенну природу композитів, зокрема міжфазні ефекти. Одним із найбільш ефективних підходів до моделювання діелектричної проникності таких матеріалів є узагальнена модель Максвелла-Вагнера, яка представляє собою розвиток теорії міжфазної поляризації, застосовуваної до пористих, шаруватих і багатофазних систем. Комплексна діелектрична проникність $\varepsilon^*(\omega)$ в рамках цієї моделі описується як функція частоти прикладеного електричного поля [13]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + j\omega\tau},$$

де ε_∞ – високочастотна діелектрична проникність, яка відображає моментальну поляризацію (електронна та атомна); $\Delta\varepsilon$ – діелектрична релаксаційна сила, або амплітуда дисперсії, яка дорівнює різниці між статичною та високочастотною діелектричними проникностями; τ – час релаксації, який характеризує час, необхідний для встановлення рівноваги поляризації після зміни електричного поля. У випадку двофазної системи:

$$\tau = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_i (\sigma_m + \sigma_i)}{\sigma_m \sigma_i (\varepsilon_m + \varepsilon_i)},$$

де ε_m і ε_i – діелектричні проникності матриці та включень відповідно; σ_m і σ_i – провідності матриці та включень відповідно.

Виділення дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності дозволяє здійснити поглиблений аналіз релаксаційних процесів, що відбуваються на

межах фаз у складних структурованих матеріалах. Такий підхід є особливо інформативним для дослідження властивостей вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ), оскільки дозволяє інтерпретувати експериментальні дані не лише на рівні інтегральних значень, а й у контексті локальних змін структури, фазового складу та ступеня однорідності. Дійсна (ε') та уявна (ε'') складові комплексної діелектричної проникності дорівнюють:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad \varepsilon''(\omega) = \frac{\Delta\varepsilon \cdot \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}.$$

Аналіз змін значень ε' та ε'' у частотному та температурному діапазонах забезпечує можливість виділення характерних релаксаційних параметрів, визначення механізмів поляризації та електричних втрат, а також оцінки впливу мікроструктурних особливостей на електрофізичну поведінку матеріалу. Це, в свою чергу, є основою для коректної інтерпретації фізичних процесів, що протікають під час формування, модифікації або експлуатації ВВКМ, та є необхідною умовою для розробки ефективних моделей і алгоритмів управління технологічними процесами.

Визначення комплексної діелектричної проникності ВВКМ, згідно з представленою моделлю, може бути реалізоване із застосуванням метода високочастотної діагностики, що дозволяє реєструвати зміну $\varepsilon'(\omega)$ та $\varepsilon''(\omega)$ у широкому частотному діапазоні. На рисунку 1 наведено характерну частотну залежність дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності для ВВКМ, змодельовану на основі моделі Максвелла-Вагнера.

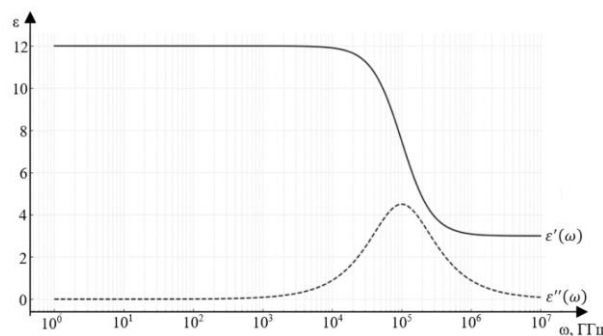


Рисунок 1 – Частотна залежність дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності ВВКМ за моделлю Максвелла-Вагнера

З аналізу представленого графіку чітко видно, що дійсна частина діелектричної проникності ε' (суцільна лінія) демонструє спад від 12 до 3 зі збільшенням частоти. Це свідчить про перехід від повної (включаючи інтерфейсну) поляризації на низьких частотах до переважно миттєвої (електронної та атомної) поляризації на високих частотах. Таке характерне зменшення діелектричної проникності із зростанням частоти є типовим для композитних матеріалів з неоднорідною структурою. Уявна частина ε'' (пунктирна лінія), що характеризує діелектричні втрати, має чітко виражений максимум на певній частоті, який відповідає релаксаційному максимуму втрат, що є характерним для інтерфейсної поляризації ВВКМ. Отримані результати можуть бути використані як в рамках контролю в реальному часі, так і для верифікації чисельних моделей, застосовуваних при проєктуванні технологічних режимів виготовлення ВВКМ.

Характерну температурну залежність дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності для ВВКМ, змодельовану на основі моделі Максвелла-Вагнера в діапазоні температур 600–1600 °С при частоті 1 ГГц, представлено на рисунку 2.

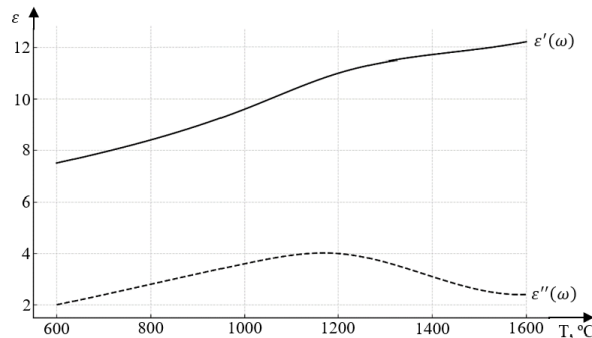


Рисунок 2 – Температурна залежність дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності ВВКМ за моделлю Максвелла-Вагнера

Як видно з графіка, зі зростанням температури спостерігається монотонне збільшення значення ε' , що свідчить про зростання ступеня графітизації матеріалу, зменшення пористості та підвищення структурної впорядкованості. У той же час уявна частина ε'' демонструє виражений максимум приблизно при 1200 °С, що свідчить про релаксацийні процеси, які мають місце на межах фазових переходів або структурних перебудов, зокрема пов'язаних із видаленням залишкових летких компонентів, локальними деформаціями або змінами топології пористої мережі. Така поведінка є типовою для гетерогенних композитів, де міжфазна поляризація та неоднорідність провідних властивостей викликають інтенсивні діелектричні втрати при певних температурах. Інформація, що отримується з $\varepsilon'(T)$ та $\varepsilon''(T)$, може бути використана як інформативний індикатор внутрішніх змін у матеріалі в процесі термічної обробки. Зокрема, стабілізація ε' на високих температурах сигналізує про досягнення насиченого стану графітизації, а локальні піки ε'' дозволяють ідентифікувати температурні діапазони, у яких відбуваються релаксацийні або дифузійні процеси.

Отримані залежності можуть бути використані як елемент зворотного зв'язку в системах автоматизованого управління процесами термообробки ВВКМ, що забезпечить підвищення якості матеріалу завдяки точному регулюванню температурного профілю, оптимізації режимів просочення та зменшенню ймовірності утворення структурних дефектів.

Для розробки математичних моделей контролю якості під час виробництва ВВКМ доцільно застосовувати модель Максвелла-Гарнета, яка є узагальненою моделлю ефективного середовища, та дозволяє описувати макроскопічні електрофізичні властивості гетерогенних матеріалів через мікроскопічні характеристики їх складових. Основною перевагою цієї моделі є її аналітична простота та здатність враховувати вплив об'ємної частки включень, діелектричних властивостей кожної фази та особливостей геометричного розподілу на ефективні характеристики композиту. Для ВВКМ ця модель дозволяє враховувати вплив пористості, що формується внаслідок процесів піролізу або термоградієнтного просочення, на результуючу діелектричну проникність. Ефективна діелектрична проникність композиту ε_{eff} в рамках цієї моделі розраховується за формулою [14]:

$$\varepsilon_{eff} = \varepsilon_m \frac{(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m) + 2f(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m)}{(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m) - f(\varepsilon_i + 2\varepsilon_m)},$$

ε_m – діелектрична проникність матеріалу матриці (основного середовища); ε_i – діелектрична проникність матеріалу включень (диспергованої фази); f – об'ємна частка включень у композиті ($0 \leq f \leq 1$). Це відношення об'єму включень до загального об'єму композиту.

Результати чисельного моделювання, виконаного на основі моделі Максвелла-Гарнета, показують залежність ефективної діелектричної проникності ВВКМ від рівня пористості (φ , %), який інтерпретується як об'ємна частка включень повітря, наведено на рисунку 3. Зі зростанням пористості від 0 до 2% спостерігається майже лінійне зниження ефективної діелектричної проникності композиту з приблизно 6 до 5,86. Така динаміка пояснюється тим, що порожнини (включення повітря з $\varepsilon \approx 1$) заміщують частину об'єму поляризованої вуглецевої матриці ($\varepsilon \approx 6$), знижуючи загальну здатність матеріалу до електричної поляризації та накопичення енергії.

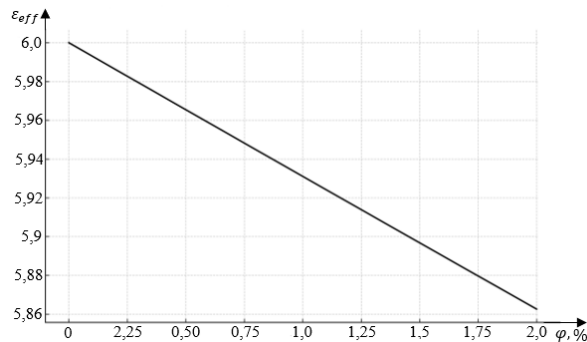


Рисунок 3 – Залежність ефективної діелектричної проникності ВВКМ від пористості за моделлю Максвелла-Гарнета

За умов рівномірного розподілу включень та їх слабкої взаємодії модель Максвелла-Гарнета дозволяє достовірно описувати зміни електрофізичних властивостей композитів, забезпечуючи кількісну оцінку впливу мікроструктурних параметрів на макроскопічну поведінку матеріалу. Зниження ε_{eff} при збільшенні пористості є важливим фактором для проектування технологічних режимів обробки та контролю якості ВВКМ. Оскільки діелектрична проникність безпосередньо впливає на радіочастотні, теплофізичні та сенсорні характеристики композитів, тому можливість керувати нею через регулювання рівня пористості дозволить оптимізувати матеріали до конкретних функціональних вимог. Під час термоградієнтного просочення або багаторазових циклів карбонізації, точний контроль структури порового простору забезпечує спрямований вплив на ε_{eff} , гарантуючи формування однорідної, стабільної мікроструктури з прогнозованими властивостями, що є необхідною умовою для створення високоякісних композитів з повторюваними характеристиками.

При виготовленні ВВКМ термоградієнтним методом є важливим дотримання технічних вимог до вибору високотемпературного обладнання, систем точного регулювання температурного поля та засобів моніторингу параметрів у реальному часі. Це дозволить забезпечити стабільність градієнта, контроль умов обробки та формування однорідної мікроструктури з прогнозованими властивостями. Забезпечення стабільного

температурного градієнта є важливим чинником, що визначає якість та однорідність структури матеріалу. Для проведення таких досліджень доцільно використовувати високотемпературні лабораторні печі, здатні підтримувати робочий діапазон до 1600 °C з точністю регулювання температури не гіршою за ± 1 °C. У конструкції печей мають бути передбачені можливості інтеграції термопар, а також сумісність із високочастотними вимірювальними системами, що дозволяє проводити електрофізичний аналіз прямо під час термообробки. Як нагрівальні елементи бажано використовувати карбід кремнію або молібден-дисиліцид, що забезпечують довговічність та термостійкість.

Одним з найбільш ефективних способів формування контрольованого термоградієнта є застосування індукційного нагріву. Завдяки дії змінного електромагнітного поля він дозволяє створювати локалізовані зони високої температури (до 2500–3000 °C), що особливо ефективно в умовах вакууму або інертної атмосфери. Таке джерело нагріву добре поєднується з системами безконтактного діагностування, зокрема мікрохвильовими зондами. Ці пристрої працюють на частотах 2,45 або 10 ГГц і дають змогу вимірювати локальні значення дійсної та уявної складових комплексної діелектричної проникності. Конструктивно зонд може бути виконаний у вигляді диполя, петлі або коаксіального шлейфа і встановлюється вздовж або збоку зразка. Він підключається до СВЧ-аналізатора, який дозволяє з високою точністю фіксувати зміну електрофізичних параметрів на різних етапах обробки.

Контроль діелектричних характеристик у реальному часі дозволяє адаптувати технологічні параметри в режимі зворотного зв'язку. Зокрема, зміни ϵ' та ϵ'' є індикаторами ступеня графітизації, рівня просочення, наявності структурних дефектів або завершення піролізу. Отримані дані інтегруються у цифрові системи управління, які коригують температурний профіль, інтенсивність поля або тривалість нагріву. Це забезпечує точну відповідність кінцевих властивостей матеріалу заданим вимогам. Впровадження програмного регулювання, зокрема із залученням елементів штучного інтелекту, дає змогу створювати адаптивні системи керування з підвищеним рівнем автономності [15–17]. Такі підходи дозволяють не лише забезпечити повторюваність параметрів, а й сприяють формуванню однорідної мікроструктури з передбачуваними електричними, тепловими та механічними характеристиками. Таким чином, поєднання високоточної термоградієнтної обробки, мікрохвильової діагностики та цифрового управління створює основу для ефективного контролю якості та оптимізації виробничого процесу виготовлення ВВКМ.

У результаті проведеного дослідження встановлено, що комплексний контроль діелектричної проникності ВВКМ є ефективним способом моніторингу процесів графітизації, піролізу та просочення. Застосування індукційного нагріву в поєднанні зі СВЧ-методами вимірювання дозволяє в режимі реального часу відстежувати зміни в структурі матеріалу та оперативно коригувати технологічні параметри. Модель Максвелла-Гарнета показала високу ефективність для оцінювання впливу пористості на ефективну діелектричну проникність, що є важливим для прогнозування радіочастотних, теплопровідних та сенсорних властивостей композитів. Запропонований підхід є перспективним для створення адаптивних систем керування, що базуються на зворотному зв'язку, і може бути інтегрований у сучасні виробничі процеси для підвищення якості та стабільності матеріалів, які використовуються в критично важливих галузях промисловості. Отримані результати можуть бути використані як в рамках контролю в реальному часі, так і для верифікації чисельних моделей, застосовуваних при проєктуванні технологічних режимів виготовлення ВВКМ та можуть бути корисними для застосувань у різних галузях промисловості.

Література

1. Liu L., Kong L. B., Yin W. Y., Chen Y. Microwave Dielectric Properties of Carbon Nanotube Composites. *Carbon Nanotubes, IntechOpen*. 2010. Vol. 3. P. 93–108.
2. Ovcharenko V., Tokarieva O. Organizational aspects of quality assurance in the production of carbon-carbon composite material blanks // *XIV International scientific and practical conference «The latest technologies in scientific activity and the educational process»*, December 03–06, 2024, Porto, Portugal. International Science Group, 2024. P. 398–400.
3. Voyevodin V. N., Gribanov Yu. O., Gurin V. A. et al. Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review). *Problems of Atomic Science and Technology*. 2015. No. 2 (96). P. 52–64.
4. Gurin I. V., Nevliudov I. Sh., Ovcharenko V. Ye., Tokarieva O. V. Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation. *Problems of atomic science and technology*. 2024. No. 1 (149). P. 125–127.
5. Гурін І. В., Невлюдов І. Ш., Овчаренко В. Є., Токарева О. В. Застосування ВВКМ для виготовлення високотемпературних нагрівачів теплових вузлів з автоматичним регулюванням температури. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2023. № 3. С. 56–66.
6. Gurin I., Ovcharenko V., Tokarieva O., Moshnik O. The use of CCCM for the creation of the high temperature detectors of the water vapor. *Problems of atomic science and technology*. 2023. No. 2 (144). P. 140–142.
7. Гурін І. В., Невлюдов І. Ш., Овчаренко В. Є., Токарева О. В. Дослідження щільності ВВКМ та її вплив на електричний об'ємний питомий опір. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2024. № 3. С. 61–70.
8. Orloff N. D., Long C. J., Obrzut J. et al. Noncontact conductivity and dielectric measurement for high throughput roll-to-roll nanomanufacturing. *Scientific Reports*. 2015. No. 5. Article number 17019. doi: 10.1038/srep17019. PMID: 26592441; PMCID: PMC4655476.
9. Ezzat M., Sabiha N.A., Izzularab M. Accurate model for computing dielectric constant of dielectric nanocomposites. *Applied Nanoscience*. 2014. No. 4. P. 331–338.
10. Eto M., Ishii T., Inagaki T., Okamoto Y. Infrared radiation properties of the carbon-carbon composite and their application to nondestructive detection of its defects. *Carbon*. 2002. Vol. 39, Iss. 3. P. 285–294.
11. Chao H. W., Hsu H. C., Chen Y. R., Chang T. H. Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages. *Scientific Reports*. 2021. No. 11 (1). Article number 17475.
12. Івах Р. М. Систематизація методів вимірювання діелектричної проникності. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2015. Т. 25, № 2. С. 141–145.
13. Markel V. A., Schotland J. C. Homogenization of Maxwell's equations in periodic composites: Boundary effects and dispersion relations. *Physical Review E*. 2012. Vol. 85, Iss. 6, No. 066603.
14. Mackay T. G., Lakhtakia A. Application of Bruggeman and Maxwell Garnett homogenization formalisms to random composite materials containing dimers. *Waves in Random and Complex Media*. 2015. Vol. 25, Iss. 3. P. 429–454.
15. Ovcharenko V. E., Tokareva E. V., Gurin I. V. Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system. *Problems of atomic science and technology*. 2018. No. 2 (114). P. 133–137.

16. Гурін І. В., Невлюдов І. Ш., Овчаренко В. Є., Токарева О. В. Система автоматичного управління з нейронмережевими регуляторами для підвищення якості ВВКМ. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2024. № 2. С. 104–116.

17. Ovcharenko V., Tokarieva O. Neural network adaptive control system for a vacuum diffusion furnace. *XVI International scientific and practical conference «New ways of improving outdated methods and technologies»*, December 17–20, 2024, Copenhagen, Denmark. International Science Group, 2024. P. 317–319.

Bibliography (transliterated)

1. Liu L., Kong L. B., Yin W. Y., Chen Y. (2010). Microwave Dielectric Properties of Carbon Nanotube Composites. *Carbon Nanotubes, IntechOpen*, 3, 93–108.

2. Ovcharenko V., Tokarieva O. (2024). Organizational aspects of quality assurance in the production of carbon-carbon composite material blanks. *XIV International scientific and practical conference «The latest technologies in scientific activity and the educational process»*, December 03–06, 2024 (pp. 398–400). Porto, Portugal. International Science Group.

3. Voyevodin V. N., Griбанov Yu. O., Gurin V. A., Gurin I. V., Gujda V. V. (2015). Carbon-graphite materials in nuclear-power engineering (review). *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(96), 52–64.

4. Gurin I. V., Nevliudov I. Sh., Ovcharenko V. Ye., Tokarieva O. V. (2024). Using of carbon-carbon composite materials for creation of thermal-resistive converter of thermal radiation. *Problems of atomic science and technology*, 1(149), 125–127.

5. Gurin I. V., Nevliudov I. Sh., Ovcharenko V. Ye., Tokarieva O. V. (2023). Zastosuvannya VVKM dlia vyhotovlennia vysokotemperaturnykh nahriuvachiv teplovykh vuzliv z avtomatychnym rehulivanniam temperatury. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, 3, 56–66.

6. Gurin I., Ovcharenko V., Tokarieva O., Moshnik O. (2023). The use of CCCM for the creation of the high temperature detectors of the water vapor. *Problems of atomic science and technology*, 2(144), 140–142.

7. Gurin I. V., Nevliudov I. Sh., Ovcharenko V. Ye., Tokarieva O. V. Doslidzhennia shchilnosti VVKM ta yii vplyv na elektrychnyi obiemnyi pytomyi opir. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, 3, 61–70.

8. Orloff N. D., Long C. J., Obrzut J., Maillaud L., Mirri F., Kole T. P., McMichael R. D., Pasquali M., Stranick S. J., Liddle J. A. (2015). Noncontact conductivity and dielectric measurement for high throughput roll-to-roll nanomanufacturing. *Scientific Reports*, 5, 17019.

9. Ezzat M., Sabiha N. A., Izzularab M. (2014). Accurate model for computing dielectric constant of dielectric nanocomposites. *Applied Nanoscience*, 4, 331–338.

10. Eto M., Ishii T., Inagaki T., Okamoto Y. (2002). Infrared radiation properties of the carbon-carbon composite and their application to nondestructive detection of its defects. *Carbon*, 39, 3, 285–294.

11. Chao H. W., Hsu H. C., Chen Y. R., Chang T. H. (2021). Characterizing the dielectric properties of carbon fiber at different processing stages. *Scientific Reports*, 11(1), 17475.

12. Ivakh R. M. (2015). Systematyzatsiia metodiv vymiriuvannia dielektrychnoi proniknosti. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 25, 2, 141–145.

13. Markel V. A., Schotland J. C. (2012). Homogenization of Maxwell's equations in periodic composites: Boundary effects and dispersion relations. *Physical Review E.*, 85, 6, No. 066603.

14. Mackay T. G., Lakhtakia A. (2015). Application of Bruggeman and Maxwell Garnett homogenization formalisms to random composite materials containing dimers. *Waves in Random and Complex Media*, 25, 3, 429–454.

15. Ovcharenko V. E., Tokareva E. V., Gurin I. V. (2018). Development of the heating element from carbon-carbon composite material and electrothermal thruster temperature control system. *Problems of atomic science and technology*, 2(114), 133–137.

16. Gurin I. V., Nevliudov I. Sh., Ovcharenko V. Ye., Tokarieva O. V. (2024). Systema avtomatychnoho upravlinnia z neiromerezhevymy rehuliiatoramy dlia pidvyshchennia yakosti VVKM. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, 2, 104–116.

17. Ovcharenko V., Tokarieva O. (2024). Neural network adaptive control system for a vacuum diffusion furnace. *XVI International scientific and practical conference «New ways of improving outdated methods and technologies»*, December 17–20. (pp. 317–319). Copenhagen, Denmark. International Science Group.

УДК 621.365.4

І. Ш. Невлюдов, В. Є. Овчаренко, О. В. Токарева, І. В. Гурін

АВТОМАТИЗАЦІЯ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВИГОТОВЛЕННЯ ВВКМ НА ОСНОВІ КОНТРОЛЯ ДІЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

У роботі розглянуто підходи до автоматизованого контролю технологічних параметрів під час виготовлення вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів (ВВКМ) з використанням вимірювання діелектричних характеристик у режимі реального часу. Досліджено вплив температури, частоти електромагнітного поля, пористості, швидкості термообробки на зміну комплексної діелектричної проникності композиту.

Проаналізовано переваги та обмеження використання методу плоского конденсатора, що базується на вимірюванні ємності зразка, поміщеного між плоскими електродами. Зазначено, що для складних гетерогенних матеріалів, таких як ВВКМ, доцільним є застосування моделей ефективного середовища.

Використано аналітичні підходи, основані на моделях Максвелла-Вагнера та Максвелла-Гарнета, що дозволяють враховувати мультифазну структуру, неоднорідності, наявність дефектів і міжфазну поляризацію. Показано, що дійсна та уявна складові комплексної діелектричної проникності є чутливими до мікроструктурних змін, і можуть бути застосовані як інформативні параметри для оцінки ступеня графітизації, рівномірності просочення, фазових переходів та вмісту залишкових летких компонентів.

Наведено характерні частотні та температурні залежності дійсної та уявної частин комплексної діелектричної проникності для ВВКМ, змодельовані на основі моделі Максвелла-Вагнера. Представлено результати чисельного моделювання ефективної діелектричної проникності з урахуванням пористості згідно з моделлю Максвелла-Гарнета. Показано, що збільшення пористості від 0 до 2 % викликає майже лінійне зниження ефективної діелектричної проникності, що пов'язано зі зменшенням здатності матеріалу до поляризації внаслідок заміщення вуглецевої матриці повітряними включеннями.

Обґрунтовано доцільність використання індукційного нагріву для реалізації стабільного температурного градієнта в процесі термообробки, а також застосування СВЧ-зондів для безконтактного локального контролю діелектричних параметрів. Показано, що інтеграція результатів діелектричної діагностики в цифрові системи керування дозволить в реальному часі адаптувати технологічні режими, забезпечуючи точність, стабільність та повторюваність характеристик кінцевого матеріалу. Отриманні результати можуть бути використані як в рамках контролю в реальному часі, так і для верифікації чисельних моделей, застосовуваних при проєктуванні технологічних режимів виготовлення ВВКМ та можуть бути корисними для застосувань у різних галузях промисловості.

Ключові слова: автоматизація, технологічний процес, вуглець-вуглецевий композиційний матеріал, заготовка, діелектрична проникність, контроль, температура.

Nevlyudov I., Ovcharenko V., Tokarieva O., Gurin I.

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETER REGULATION IN CCCM MANUFACTURING BASED ON DIELECTRIC CHARACTERISTICS CONTROL

This article explores approaches to the automated control of technological parameters during the production of carbon-carbon composite materials (CCCM) through real-time monitoring of their dielectric properties. The influence of temperature, electromagnetic field frequency, porosity, and thermal processing rate on changes in the composite's complex dielectric permittivity has been investigated.

The advantages and limitations of the parallel-plate capacitor method, which is based on measuring the capacitance of a sample placed between flat electrodes, are analyzed. It is noted that for complex heterogeneous materials such as CCCM, the use of effective medium models is appropriate.

Analytical approaches based on the Maxwell-Wagner and Maxwell-Garnett models are employed. These models enable the consideration of multiphase structures, heterogeneities, defects, and interfacial polarization. It is demonstrated that both the real and imaginary components of the complex dielectric permittivity are sensitive to microstructural changes and can serve as informative parameters for assessing the degree of graphitization, uniformity of impregnation, phase transitions, and the content of residual volatile components.

Characteristic frequency and temperature dependencies of the real and imaginary parts of the complex dielectric permittivity for CCCM, simulated using the Maxwell-Wagner model, are presented. The results of numerical modelling of effective dielectric permittivity accounting for porosity, based on the Maxwell-Garnett model, are also provided. It is shown that an increase in porosity from 0 to 2 % leads to an almost linear decrease in the effective dielectric permittivity, which is associated with a reduced ability of the material to polarize due to the replacement of the carbon matrix with air inclusions.

The feasibility of using induction heating to achieve a stable temperature gradient during thermal processing is substantiated, along with the application of microwave probes for non-contact local monitoring of dielectric parameters. It is shown that integrating dielectric diagnostics data into digital control systems enables real-time adaptation of technological regimes, ensuring the accuracy, stability, and repeatability of the final material's properties. The obtained results can be applied both within the framework of real-time process control and for validating numerical models used in the design of CCCM manufacturing processes. They may also be useful for applications across various industrial sectors.

Keywords: automation, technological process, carbon-carbon composite material, workpiece, dielectric permittivity, monitoring, temperature.

І. Г. Зезекало, д-р техн. наук, професор, М. М. Подоляк, аспірант

АВТОКЛАВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КАТАЛІТИЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СИРОВИНИ

¹Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»,
Полтава

Ключові слова: важковидобувні запаси, вуглеводні, каталіз, внутрішньопластовий крекінг, конверсія вуглеводнів, фракційний склад, каталізатор, активні центри, каталітично-активна суміш, гідрокрекінг, інтенсифікація видобутку.

Вступ

Актуальність залучення до розробки покладів важковидобувних запасів обумовлена наявністю на території України родовищ, які містять значні запаси важкої високов'язкої нафти та випавшого ретроградного конденсату, видобуток яких є малоефективним або зовсім неможливим при застосуванні традиційних методів. На даний час більше 50% всіх запасів України характеризуються як важковидобувні і пов'язані з високим вмістом парафіну, смол та асфальтенів, наявність яких значно погіршує реологічні властивості та створює значний гідравлічний опір рухові по фільтраційних каналах. Середній коефіцієнт вилучення важковидобувних запасів на родовищах України складає приблизно 0,15, а у світі – 0,46. Окремо слід виділити нерухомий ретроградний конденсат. Так, наприклад, запаси Котелевського чи Тимофіївського родовищ, складають приблизно 10 млн. т, які представляють суттєво значну сировинну базу. [8] Тому, актуальним питанням постає введення в розробку важковидобувних запасів цінної вуглеводневої сировини, а також розробку раціонального та ефективного методу її вилучення. В якості одного із перспективних методів інтенсифікації, який дозволив би видобувати важкі, високов'язкі нафти, та ретроградний конденсат, а також покращити умови їх вилучення, є метод внутрішньопластового каталітичного впливу.

Об'єктом дослідження виступає процес каталітичного перетворення складу вуглеводневої суміші в пластових умовах. *Предмет дослідження* – зміна основних фізико-хімічних властивостей вуглеводневої суміші, внаслідок зміни її фракційного складу та хімічних перетворень високомолекулярних сполук.

Сутність процесу внутрішньопластового каталізу заключається у перетворенні високомолекулярних складових вуглеводнів на сполуки з меншою молекулярною масою, що здійснюється безпосередньо в привибійній зоні пласта в присутності каталітично-активної речовини. Процеси перетворення важких вуглеводнів в пластових умовах та в присутності каталізатора супроводжуються зміною фракційного складу вуглеводнів, зменшенням густини та в'язкості компонентів, за рахунок чого досягається зменшення фільтраційного опору, що у свою чергу призводить до збільшення кількості видобутої продукції. [11] Процеси каталізу вуглеводнів на багатофункціональних каталізаторах відбуваються по карбкатионному механізму протікання реакцій в декілька стадій. Спочатку відбувається реакція каталітичного дегідрування високомолекулярних насичених сполук на активних центрах гідрування/дегідрування. Дана реакція супроводжується відщепленням атомарного водню з утворенням ненасичених вуглеводнів. В якості активних центрів гідрування/дегідрування в основному застосовуються пере-

хідні метали VI-X груп, які здатні легко змінювати свою валентність. На наступній стадії процесу відбувається крекінг вуглеводнів з розривом C-C зв'язку з попереднім їх протонуванням від донору водню та їх подальша ізомеризація. При чому розрив зв'язку між атомами вуглецю відбувається на кислотних центрах каталізатору. В якості кислотних центрів застосовуються тверді сполуки із високою питомою поверхнею, в складі яких присутні сполуки, здатні проявляти кислотні властивості (кислоти Льюїса, кислоти Бренстеда) – амфотерні оксиди, природні алюмосилікати $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$, цеоліти, гірська порода, що складає продуктивний пласт, тощо. [10]

Мета дослідження заключається в інтенсифікації вилучення важковидобувних вуглеводнів та ретроградного конденсату за рахунок покращення їх фізико-хімічних властивостей та фільтраційних характеристик.

Основні задачі, які ставляться при виконанні дослідження:

1. Розробити ефективний склад каталітично-активної суміші для здійснення інтенсифікації вилучення вуглеводневої сировини шляхом внутрішньопластового каталізу.
2. Дослідити зміну фракційного складу та фізико-хімічних властивостей вуглеводневої сировини внаслідок обробки каталітично-активною сумішшю з різним співвідношенням активних компонентів, при різних термобаричних умовах.

Обладнання та методика проведення досліджень

Сутність даного методу інтенсифікації видобутку заключається в тому, що в продуктивний пласт закачується каталітично активна суміш, активні центри якої адсорбуються на породі продуктивного пласта, утворюючи зону реакційного середовища, після чого викликається потік пластового флюїду. Вуглеводнева сировина, під дією пластових термобаричних умов та в присутності активних центрів каталізу в породі пласта, починає змінювати хімічний склад, внаслідок проходження каталітичних реакцій гідрування/дегідрування, крекінгу та ізомеризації. В результаті зростає вміст у складі пластового флюїду газоподібних компонентів типу $\text{C}_1\text{-C}_5$, фракцій $\text{C}_6\text{-C}_{10}$, а також фракцій $\text{C}_{11}\text{-C}_{16}$. Разом зі зміною компонентного складу вуглеводнів, змінюються їх фізико-хімічні властивості – зменшується в'язкість, густина, середня молекулярна маса, що призводить до покращення умов фільтрації вуглеводнів внаслідок збільшення фазової проникності, і як наслідок, призводить до зростання дебіту свердловин.

На відміну від класичного гетерогенного каталізу на багатофункціональній каталітичній суміші, в даному дослідженні процеси каталітичних перетворень відбуваються виключно в одній термодинамічній фазі – рідинній. В якості каталітично-активних сумішей, в даному випадку використовуються також багатофункціональні системи, активні центри яких, представлені сполуками перехідних металів VI-X груп (оксиди, солі), промотовані галогенвмістними органічними чи неорганічними сполуками; активні кислотні центри представлені кислотами Льюїса / Бренстеда.

Всі дослідження проводились з використанням експериментальної установки автоклавного типу, яку було розроблено для імітації процесів каталізу в умовах, наближених до пластових, а також герметичної реторти ("бомби").

Реторта ("бомба") представляє собою герметичну товстостінну розбірну ємність, циліндричної форми, призначену для випробування досліджуваної суміші, яка здатна витримувати високі тиски та температури.

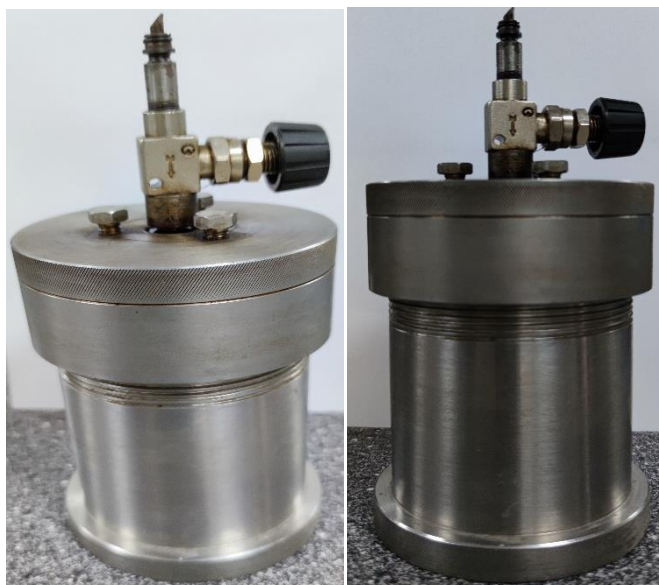


Рисунок 1 – Герметична реторта для випробування каталітичної суміші

Загальна схема експериментальної установки автоклавного типу приведена на рисунку 2.

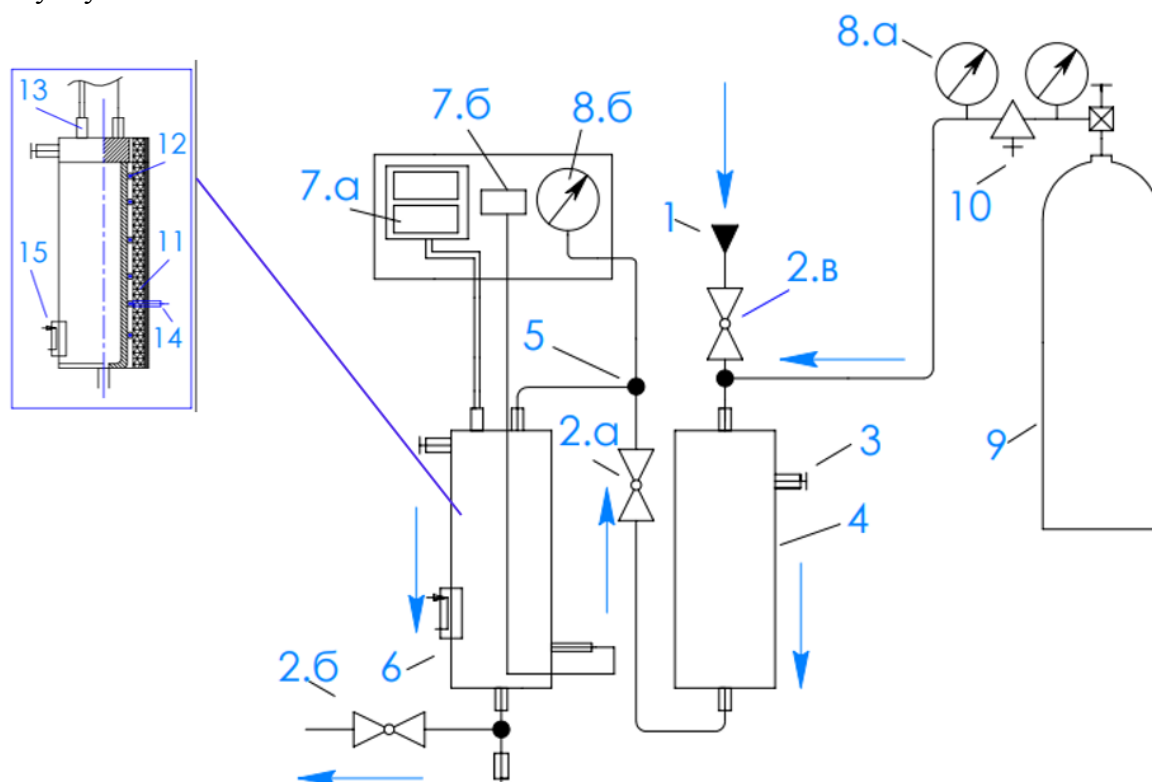


Рисунок 2 – Загальна схема експериментальної автоклавної установки:

- 1 – вхід (введення речовини); 2а,б,в – кран; 3 – повітровідвідник; 4 – буферна ємність;
 5 – трійник; 6- реактор; 7а – терморегулятор, 7.б – температура на нагрівачі; 8а,б – манометр;
 9 – балон з інертним газом; 10 – редуктор; 11 – теплоізоляція; 12 – нагрівальний елемент;
 13 – термопара (автоклав); 14 – термопара (ТЕН); 15 – біметалічне реле аварійного відключення

Експериментальна установка складається з двох товстостінних циліндричних ємностей (позиція 4 та 6 відповідно). Робочі ємності, сполучені між собою за допомогою трубок, трійників (5) та запірної арматури – кранів (2.а, 2б). Ємність (6) представляє собою герметичний автоклав-реактор, призначений для імітації та дослідження внутрішньо-пластових каталітичних процесів. Конструкція реактора розрахована на проведення досліджень процесів каталізу в термобаричних умовах, наближених до пластових, з можливістю застосування зразків реальних гірських порід та кернавого матеріалу. Циліндр (4) являє собою буферну ємність, призначену для попереднього введення досліджуваної рідини та подальшої подачі її в реактор (6). Попереднє введення технологічної рідини в ємність (4) реалізується через вхідний патрубок (1). Для здійснення нагріву середовища до необхідної температури, реактора (6) обладнаний трубчастим електронагрівачем (12) (ТЕН). Передача теплоти від ТЕНу здійснюється за рахунок безпосереднього контакту зовнішньої стінки реактору (6) із нагрівальним елементом (12).

З метою мінімізації втрат тепла в навколишнє середовище циліндр реактора вкритий шаром теплоізоляційного матеріалу (11). Установка температури робочого середовища, а також підтримка її на заданому значенні здійснюється в автоматичному режимі з використанням терморегулятора (7а). Тиск робочого середовища контролюється манометром (8.б) Подача робочої рідини з буферної ємності (4) в автоклав-реактор (6) відбувається шляхом створення перепаду тиску між двома циліндрами. З цією метою передбачено подачу інертного, по відношенню до досліджуваної рідини, газу (азот). Для здійснення подачі використовується балон із стиснутим інертним газом (9), з'єднаний із буферною ємністю установки через редукційний клапан (10). Для забезпечення контролю тиску газовий балон обладнаний манометром (8.а). З метою стримування надлишкового тиску та гідродинамічного сполучення внутрішнього простору циліндрів із атмосферою, в конструкції робочих ємностей передбачені повітровідвідні клапани (3). Видалення відпрацьованої технологічної рідини здійснюється через вихідний патрубок, при відкритому положенні крану (2.б).

Для проведення дослідів до зразку нафти чи газового конденсату визначеного об'єму додається досліджувана каталітично-активна суміш. Далі суміш вуглеводнів та каталізатору завантажується до буферної ємності установки. Після чого рідина передавляється під тиском у реактор, де здійснюється її нагрів до необхідної температури проведення дослідів. Окрім цього застосування даної установки дозволяє проводити фільтраційні дослідження активних складів в динамічному режимі, шляхом пропускання досліджуваної суміші через зразок керна (чи гірської породи) , попередньо завантажений у циліндр установки.

Далі, суміш вуглеводнів та каталізатору, нагріта до температури 90–200 °С, витримується протягом часу, необхідного для проходження каталітичних перетворень. Після витримки, рідина зливається з установки та направляється на визначення її фізико-хімічних властивостей.

Результати досліджень

В процесі проведених досліджень було розроблено декілька складів каталітично-активної суміші для визначення її оптимального складу .

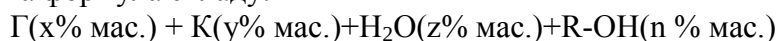
Каталітично-активні суміші представляють собою багатофункціональні склади для здійснення гомогенного процесу каталізу у рідинній фазі, який здатен проходити без застосування атмосфери водню та високих робочих тисків. У складі каталізатору наявні два типи активних центрів –дегідруючий/гідруючий, які забезпечують процеси

попередньої дегідрогенізації високомолекулярних насичених сполук та гідрогенізації за рахунок протонодонорної активності (гідрування) та подальшого каталітичного крекінгу на кислотних центрах [4]. Гідруюча/дегідруюча активність складу забезпечується сполуками перехідних металів, а кислотна активність – наявністю у складі кислот Льюїса або Бренстеда. Для активації та пришвидшення протікання хімічних перетворень, склад додатково промотується неорганічними кислотами або галогенвуглеводнями. В якості розчинника застосовуються аліфатичні одноатомні спирти.

В ході проведення досліджень, випробування каталітично-активних композицій, різних складів та з різним масовим співвідношенням активних компонентів випробувались на зразках нафти Матвіївсько-Легедівського родовища, а також газового конденсату Котелевського ГКР. Всі досліди проводились із застосуванням лабораторної установки автоклавного типу, а також герметичної реторти.

В якості каталітично-активної суміші для проведення гомогенного каталізу був використаний наступний склад: гідруючий компонент (Г) використані солі перехідних металів X групи періодичної системи хімічних елементів; в ролі кислотного активного центру (К) виступають водо-спирторозчинні сполуки перехідних металів VI групи періодичної системи хімічних елементів. В якості розчинників використовували воду або полярний розчинник класу одноатомних спиртів (R-OH).

В ході досліджень випробувались декілька зразків каталітичної суміші одного компонентного складу, але з різним масовим співвідношенням активних компонентів. Загальна формула складу:



Нижче наведені результати досліджень каталітичних сумішей на зразках нафти Матвіївсько-Легедівського родовища, проведені в ретортах.

Таблиця 1 – Результати досліджень каталітичних сумішей на зразках нафти в реторті

Фракційний склад, %	Температура кипіння, оС						
	До оброб- ки	Склад 1	Склад 2	Склад 3	Склад 4	Склад 5	Склад 6
0	94	75	80	65	60	41	55
10	140	90	90	80	68	53	62
20	178	100	105	95	75	71	78
30	220	130	145	125	95	87	94
40	256	140	155	135	125	104	112
50	290	150	185	162	145	120	132
60	320	175	205	180	165	137	144
70	347	250	275	215	190	160	167
80	370	328	315	246	220	181	191

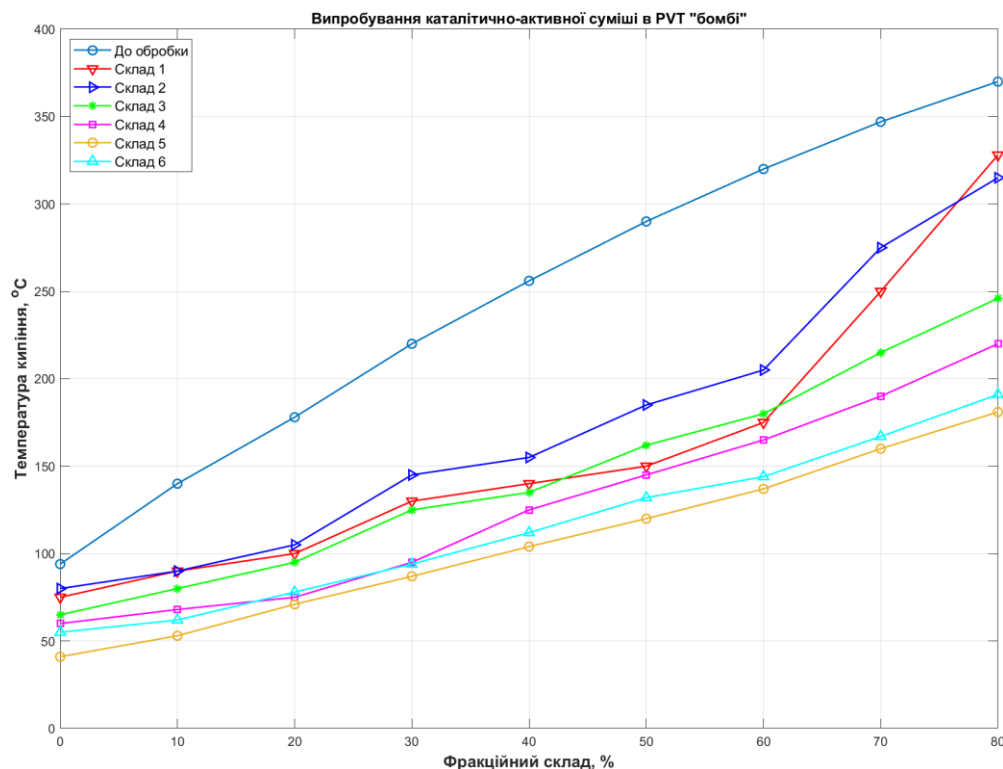


Рисунок 3 – Криві розгонки нафти Матвіївко-Легедівського родовища після обробки каталітичними складами 1...6 в герметичних ретортах

Таблиця 2 – Масові співвідношення між компонентами суміші

№ Складу	Гідруючий компонент Г, %мас.	Кислотний компонент К, %мас.	Вода H ₂ O, %мас.	Полярний розчинник R-OH, %мас.
1	5,23	5,23	31,6	58,18
2	9,65	9,65	19,30	61,40
3	9,47	9,47	28,4	52,66
4	12,97	12,97	25,94	42,12
5	13,93	13,93	27,86	44,29
6	14,37	14,37	14,37	56,99

Як видно із графіку залежностей температури кипіння від фракційного складу нафти, застосування каталітично-активної суміші сприяє зміні фракційного складу. Про зміну фракційного складу свідчить падіння температур кипіння фракцій нафти по відношенню до початкового зразка, необробленого каталізатором. У всіх випадках використання каталітично-активних складів спостерігається в тій чи іншій мірі падіння температур початку кипіння. Із графіку видно, що зі збільшенням концентрацій компонентів, які відіграють роль активних центрів каталітичних перетворень зростає падіння температур кипіння окремих фракцій нафти. Звідси можна стверджувати, що глибина конверсії високомолекулярних вуглеводнів залежить від концентрації активних компонентів. Окрім цього зі збільшенням частки води в даному складі також спостерігається збільшення падіння температур кипіння окремих фракцій. Це може бути пояснено тим, що у водному середовищі кислотний компонент утворює кислоту, яка у свою чергу ди-

соціює із утворенням протонодонорної кислоти і яка протонує молекули важких вуглеводнів, що у свою чергу призводить до розпаду її на більш легкі вуглеводні. Так на прикладі каталітичних складів 5 та 6 видно, що при однакових концентраціях гідруючого та кислотного компонентів, падіння температур кипіння відбувається в більшій мірі там де більша концентрація води.

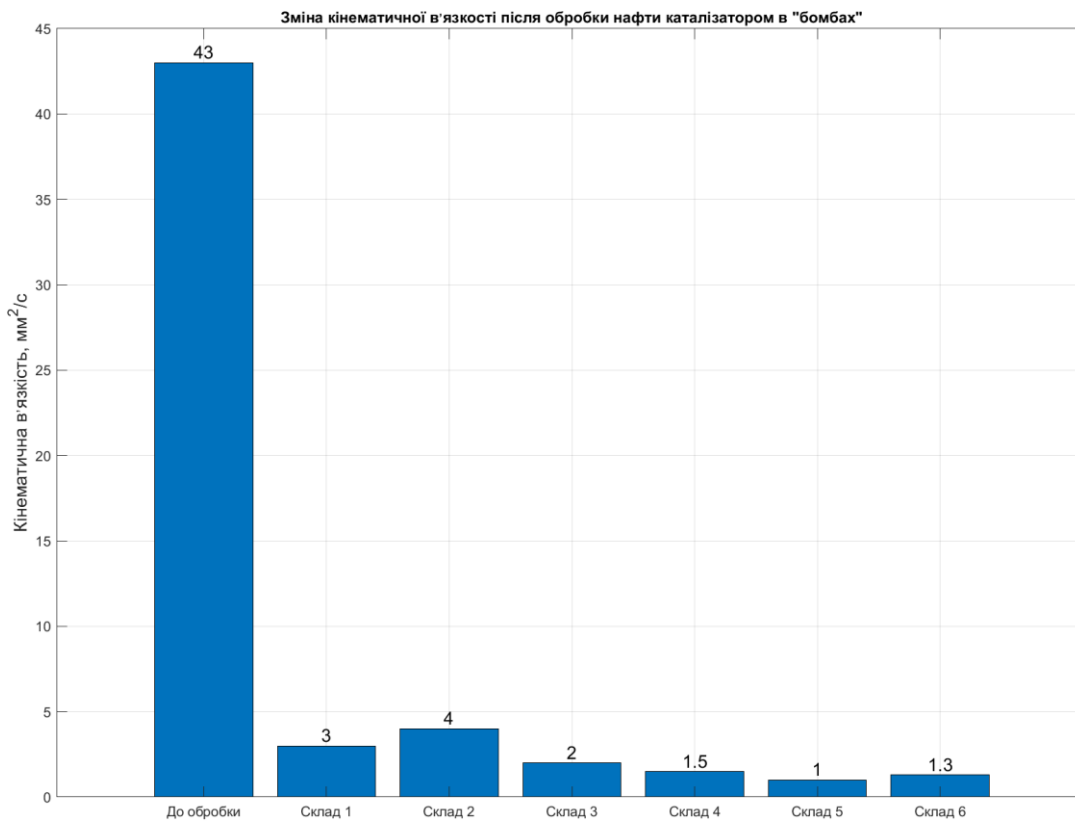


Рисунок 4 – Значення кінематичної в'язкості зразків нафти до та після обробки різними складами каталітичних сумішей

Із графіку зміни в'язкостей видно що у всіх випадках застосування каталізатору, в'язкість нафти суттєво знизилась. Найбільш ефективним виявився склад № 5. При цьому кінематична в'язкість нафти зменшилась в 43 рази.

Окрім вищезазначеного слід відмітити: в процесі досліджень спостерігалася значна втрата об'єму обробленої рідини (до 50 %), порівняно з об'ємом проби що завантажувалась у «бомбу». При цьому також відмічалось значне утворення атомарного вуглецю, що дозволяє припустити протікання процесів глибокого дегідрування. Також слід зазначити, що застосування складів 1...6 призводить до виникнення згустків високополімерних сполук. Враховуючи цей недолік, необхідно вдосконалити рецептуру, даних складів, щоб уникнути цього негативного явища.

Для проведення **автоклавних досліджень** каталітичних сумішей в експериментальній установці було взято декілька різних складів на основі неорганічних сполук перехідних металів VIII, IX та X груп в якості гідруючих/дегідруючих активних центрів, а також водо-спирторозчинних сполук, здатних проявляти кислотні або амфотерні властивості. Окрім цього, для активації та пришвидшення хімічних реакцій до складу додатково вводилися промотори, представлені сильними або слабкими неорганічними

кислотами, а також органічними гетероатомними сполуками із класу галогенвуглеводнів. В таблиці 3 наведені результати дослідження каталітичних сумішей, проведених на автоклавній установці в умовах, наближених до пластових.

Таблиця 3 – Результати досліджень каталітичних сумішей на зразках нафти в експериментальній установці автоклавного типу

Фракційний склад, %	Температура кипіння, °C								
	Склад 7	Склад 8	Склад 9	Склад 10	Склад 11	Склад 12	Склад 13	Склад 14	Склад 15
0	50	60	65	60	65	70	50	45	56
10	75	94	80	120	90	150	85	85	80
20	90	113	124	155	170	185	130	128	115
30	110	140	160	198	210	225	165	175	165
40	135	168	195	240	-	-	210	215	210
50	170	205	241	-	-	-	-	-	-
60	225	250	273	-	-	-	-	-	-

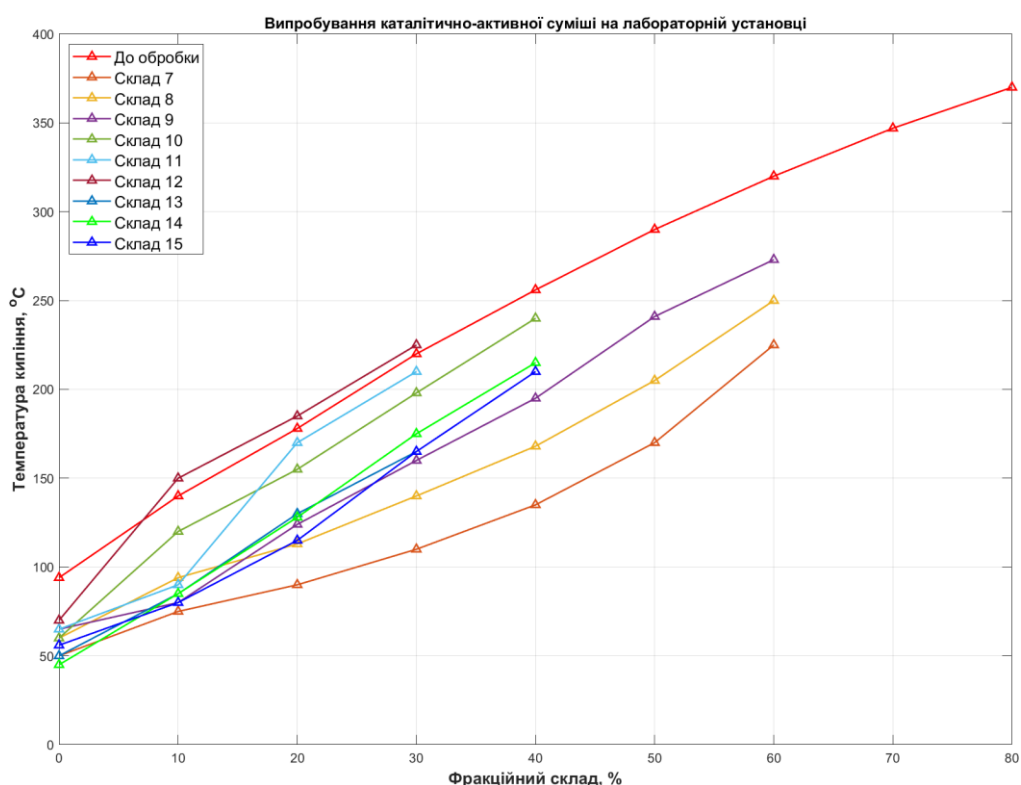


Рисунок 3 – Криві розгонки нафти Матвіївсько-Легедівського родовища після обробки каталітичними складами 7...15, в автоклавній установці

Обговорення

Як можна побачити із результатів досліджень, при обробці нафти різними складами каталітично-активної суміші, спостерігається падіння температури початку кипіння по відношенню до необробленого зразка. Це може свідчити про здійснення процесу перетворення високомолекулярних вуглеводнів, та зміну фракційного складу

нафти. В ході розгонки при використанні окремих складів (наприклад **склад 12** з використанням спиртового розчину сполук перехідних металів VIII та IX груп, без використання кислотних активних центрів) спостерігається зростання температур кипіння по відношенню до початкового зразка нафти. Це може бути пояснено проходженням реакцій в бік дегідрогенізації з утворенням більш високомолекулярних вуглеводнів. Можна припустити, що крекінг вуглеводнів не відбувався або відбувався у незначній мірі через відсутність кислотних активних центрів, на яких проходить утворення карбкатионів шляхом приєднання протонів до молекул важких вуглеводнів з подальшим розривом ланцюга по С-С зв'язку.

Застосування **складів 13, 14 та 15** які включають як гідруючі компоненти, представлені сумішшю сполук перехідних металів VIII та IX груп, а також кислотні активні центри (солі сильних неорганічних кислот), промотовані галогенвуглеводнями, а також взяті у різних масових співвідношеннях, показало значно більшу ефективність, ніж склади без кислотних активних центрів (або в недостатній кількості). Спостерігалось падіння температури початку кипіння, а також падіння температур кипіння в ході розгонки, що свідчить про збільшення вмісту легких вуглеводнів в нафті. Недостатня глибина крекінгу може бути пояснена незначною площею контакту нафти із каталітичною сумішшю. Оскільки каталітична суміш на рідкому носії (метанолі) не змішується із нафтою, а утворює поверхню поділу фаз, то каталітичні перетворення будуть відбуватись безпосередньо на поверхні контакту нафти з каталізатором.

Найбільш ефективними складами при випробуванні на установці, були **склади 7, 8 та 9**. Дані композиції у своєму складі мають гідруючі активні центри (сполуки перехідних металів X групи), та кислотні центри, представлені сполуками VI та XIII груп, що здатні проявляти кислотні властивості. В якості розчинника використана суміш полярних органічних та неорганічних сполук. В якості промотора виступають сильні неорганічні кислоти. При застосуванні даних складів спостерігається найбільше падіння температур кипіння фракцій в ході розгонки оброблених зразків нафти. Висока ефективність складу може бути пояснена значною кислотною активністю даних складів та високою протонодонорною здатністю компонентів, що безпосередньо впливає на кількість утворених карбкатионів та глибину процесу каталізу.

У промислових випробуваннях ефективність каталізаторів доведена під час дослідно-промислових досліджень на свердловині №79 Котелевського ГКР [13]. Свердловина не працювала внаслідок випадання ретроградного конденсату у пласті. Завдяки проведенню періодичної обробки привибійної зони пласта гомогенним каталізатором значно знизилась (до 3-х разів) середня молекулярна маса рідкої фази у свердловині та у 6 разів знизилась в'язкість конденсату. Свердловину запущено в роботу із дебітом 20000 м³/добу газу та 3 м³/добу конденсату.

Висновки

1. Як видно із проведених досліджень, обробка зразків нафти каталітично-активними складами сприяє зміні фракційного складу вихідної вуглеводневої сировини у всіх випадках. Про зміну фракційного складу суміші свідчить зміна температур кипіння окремих фракцій відносно початкових, необроблених каталізаторами, зразків нафти та конденсату, збільшення вмісту легких компонентів, значна зміна фізичко-

хімічних та реологічних властивостей. При обробці зразків нафти Матвіївсько-Легедівського родовища складами на основі сполук перехідних елементів VI та X групи, кінематична в'язкість нафти суттєво зменшилась. При застосуванні даних складів, кінематична в'язкість змінюється в середньому в 30 разів, а максимальне зменшення в'язкості – в 43 рази ($43 \text{ мм}^2/\text{с}$ – до обробки; $1 \text{ мм}^2/\text{с}$ – після обробки).

2. При дослідженнях впливу компонентного складу та масових співвідношень між активними компонентами на зміну фракційного складу нафти було встановлено, що глибина деструктивних каталітичних процесів (каталізу) суттєво залежить від концентрації основних активних компонентів – гідруючих/дегідруючих та кислотних центрів. Вочевидь, процеси крекінгу відбуваються саме на кислотних активних центрах. Так, на прикладі суміші, в якій застосовуються лише гідруючі/дегідруючі активні центри, а кислотні компоненти відсутні, спостерігається незначне збільшення температур кипіння фракцій відносно необробленого зразка. В той час, як склади з додаванням одночасно кислотних і гідруючих/дегідруючих активних центрів в різних масових співвідношеннях показали найбільш суттєве зниження температур кипіння окремих фракцій. При застосуванні даних композицій спостерігається зниження температур кипіння фракцій в широкому діапазоні – $50\text{--}150^\circ\text{C}$.

3. Отже, отримані результати можуть бути покладені в основу проведення подальших досліджень, а також розробок конкретних технологій вилучення та інтенсифікації важковидобувних запасів шляхом застосування процесів внутрішньопластової каталітичної конверсії вуглеводнів. Приклад упровадження процесу обробки на Котелевському родовищі доводить ефективність технології, отже дані дослідження будуть актуальні для підприємств та організацій, які мають на своїх ліцензійних ділянках проблеми з вилученням важковидобувних запасів.

Література

1. Marcilly C. Acido-basic catalysis: application to refining and petrochemistry. Vol. 1. Michigan : Editions Technip, 2005. 896 p.
2. Occelli M. L. Advances in fluid catalytic cracking: testing, characterization, and environmental regulations. Boca Raton : CRC Press, 2010. 408 p.
3. Sadeghbeigi R. Fluid catalytic cracking handbook. 3rd edition. Kidlington, Oxford : Butterworth-Heinemann, 2012. 360 p.
4. Sassykova L. R. Technology of heterolytic and homolytic oil refining processes : educational manual. Almaty : Qazaq University, 2018. 269 p.
5. Raseev S. Thermal and catalytic processes in petroleum refining. Boca Raton : CRC Press, 2003. 936 p.
6. Войцеховский Б. В., Корма А. Каталитический крекинг. Катализаторы, химия, кинетика / пер. с англ.; под ред. Н. С. Печуро. Москва : Химия, 1990. 152 с.
7. Гейтс Б., Китцир Дж., Шуйт Г. Химия каталитических процессов / пер. с англ. Москва : Мир, 1981. 448 с.
8. Зезекало І. Г., Коваленко В. І., Ларцева І. І., Дубина О. В. Застосування внутрішньопластового каталізу для вилучення важковидобувних вуглеводнів. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2021. Т. 6, № 3 (62).

9. Калечиц И. В. Химия гидрогенизационных процессов в переработке топлив. Москва : Химия, 1973. 336 с.

10. Магарил Р. З. Теоретические основы химических процессов переработки нефти : учеб. пособие для вузов. Ленинград : Химия, 1985. 280 с.

11. Спосіб вилучення вуглеводневої сировини із нафтогазоконденсатних пластів : пат. 79373 Україна : E21B 43/25, E21B 43/24 / І. Г. Зезекало, Б. Б. Синюк, А. Й. Куль, В. І. Коваленко ; заявл. 20.08.2012 ; опубл. 25.04.2013. Бюл. № 8. 6 с.

12. Томас У. Промышленные каталитические процессы и эффективные катализаторы / пер. с англ. ; под ред. А. М. Рубинштейна. Москва : Мир, 1973.

13. Zezekalo I., Lukin O., Okrepkyi R. et al. Prospects for developing the hydrocarbon potential of deposits of heavy high-viscosity oil, petroleum bitumen, residual oil and falling condensate in the subsoils of Ukraine. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип. 168. С. 121–138.

Bibliography (transliterated)

1. Marcilly C. (2005). Acido-basic catalysis: application to refining and petrochemistry. (Vol. 1). Michigan: Editions Technip. 896 p.

2. Occelli M. L. (2010). Advances in fluid catalytic cracking: testing, characterization, and environmental regulations. Boca Raton: CRC Press. 408 p.

3. Sadeghbeigi R. (2012). Fluid catalytic cracking handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann. 360 p.

4. Sasykova L. R. (2018). Technology of heterolytic and homolytic oil refining processes: educational manual. Almaty: Qazaq University. 269 p.

5. Raseev S. (2003). Thermal and catalytic processes in petroleum refining. Boca Raton: CRC Press. 936 p.

6. Voitsekhovskiy B. V., Korma A. (1990). Katalitychnyi kreinh. Katalizatory, khimiia, kinetyka. per. z anhl. N. S. Pechuro (Ed.). Moskva: Khimiia. 152 p.

7. Heits B., Kitsir Dzh., Shuit H. (1981). Khimiia katalitychnykh protsesiv. per. z anhl. Moskva: Mir. 448 p.

8. Zezekalo I. H., Kovalenko V. I., Lartseva I. I., Dubyna O. V. (2021). Zastosuvannia vnutrishnoplavovoho katalizu dlia vyluchennia vazhkovydobuvnykh vuhlevodniv. *Tekhnologichnyi audyt ta rezervy vyrobnytstva*, 6, 3 (62).

9. Kalechyts I. V. (1973). Khimiia hidrogenizatsiinykh protsesiv u pererobtsi topliv. Moskva: Khimiia. 336 p.

10. Maharil R. Z. (1985). Teoretychni osnovy khimichnykh protsesiv pererobky nafty : navch. posibnyk dlia vuziv. Lenynhrad: Khimiia. 280 p.

11. Zezekalo I. H., Syniuk B. B., Kul A. Y., Kovalenko V. I. Sposib vyluchennia vuhlevodnevoi syrovyny iz naftohazokondensatnykh plastiv : pat. 79373 Ukraina : E21B 43/25, E21B 43/24 ; zaiavl. 20.08.2012 ; opubl. 25.04.2013. Biul. № 8. 6 p.

12. Tomas U. (1973). Promyshlennye kataliticheskie protsessy i effektivnye katalizatory. per. s anhl., A. M. Rubinshteina (Ed.). Moskva: Mir.

13. Zezekalo I., Lukin O., Okrepkyi R., Pedchenko L., Pedchenko M., Sulim A. (2024). Prospects for developing the hydrocarbon potential of deposits of heavy high-

viscosity oil, petroleum bitumen, residual oil and falling condensate in the subsoils of Ukraine. *Geotekhnichna mekhanika*, 168, 121–138.

УДК 622.276

І. Г. Зезекало, М. М. Подоляк

АВТОКЛАВНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КАТАЛІТИЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ВУГЛЕВОДНЕВОЇ СИРОВИНИ

На сьогоднішній день такі процеси як крекінг, риформінг, гідроочищення, ізомеризація та алкілування вуглеводнів відомі і широко застосовуються для промислової переробки вуглеводневої сировини, однак використання їх в пластових умовах на нафтогазоконденсатних родовищах з метою інтенсифікації притоків вуглеводнів залишається не достатньо вивченим та потребує проведення широкого комплексу досліджень.

Для досліджень використовується експериментальна установка, яка складається із двох товстостінних циліндричних робочих ємностей. Конструкція циліндрів розрахована на проведення досліджень процесів каталізу в умовах, що наближені до пластових, та з можливістю застосування зразків гірських порід.

Під час проведення досліджень до зразку нафти чи газового конденсату визначеного об'єму додається каталітично-активна суміш, яка завантажується до буферної ємності установки. Робоча рідина продавлюється під тиском у реактор, де здійснюється її нагрів до необхідної температури проведення дослідів.

В ході проведеного дослідження, розроблено рецептуру каталітично-активної суміші, досліджено вплив складу та масових співвідношень активних компонентів каталізатору на зміну фракційного складу зразків нафти та газового конденсату, а також їх фізико-хімічних властивостей. Ґрунтуючись на, отриманих в ході дослідження результатах, можна стверджувати, що запропонований метод інтенсифікації вилучення важковидобувних вуглеводнів за допомогою каталітичних перетворень є ефективним.

На відміну від існуючих процесів гідрокрекінгу вуглеводнів, дана технологія передбачає проведення каталітичних перетворень в пластових умовах безпосередньо в продуктивному пласті, а запропонована каталітична суміш здатна проявляти значну каталітичну активність при відносно невисоких значеннях температури реакційного середовища – 80–140 °С. При цьому технологія обробки породи продуктивного пласта каталізатором мало чим відрізняється від типової обробки поверхнево-активними речовинами (ПАР). В результаті це дозволить збільшити кількість видобутої нафти, залучити до процесу розробки поклади важковидобувних запасів, а також значно покращити умови виносу на поверхню вуглеводнів.

Ключові слова: важковидобувні запаси, вуглеводні, каталіз, внутрішньопластовий крекінг, конверсія вуглеводнів, фракційний склад, каталізатор, активні центри, каталітично-активна суміш, гідрокрекінг, інтенсифікація видобутку.

I. H. Zezekalo, M. M. Podolyak

AUTOCLAVE RESEARCH OF CATALYTIC CONVERSION OF HYDROCARBON RAW MATERIALS

Currently, processes such as cracking, reforming, hydrotreating, isomerization, and alkylation of hydrocarbons are well-known and widely used in the industrial processing of hydrocarbon feedstock. However, their application under reservoir conditions in oil and gas condensate fields for the purpose of intensifying hydrocarbon inflow remains insufficiently studied and requires a comprehensive range of research.

The studies are conducted using an experimental setup consisting of two thick-walled cylindrical working chambers. The design of these cylinders is intended for catalytic process research under conditions close to those found in reservoirs, with the ability to accommodate rock samples.

During the experiment, a catalytically active mixture is added to a measured volume of crude oil or gas condensate and loaded into the buffer chamber of the setup. The working fluid is then injected under pressure into the reactor, where it is heated to the required reaction temperature.

In the course of the study, a formulation for a catalytically active mixture was developed. The influence of the composition and mass ratios of the catalyst's active components on the fractional composition and physicochemical properties of crude oil and gas condensate samples was investigated. Based on the obtained results, it can be concluded that the proposed method for enhancing the recovery of hard-to-extract hydrocarbons via catalytic transformations is effective.

Unlike conventional hydrocracking processes, this technology involves conducting catalytic transformations under in-situ reservoir conditions directly within the productive formation. The proposed catalytic mixture demonstrates significant catalytic activity at relatively low reaction temperatures ranging from 80 to 140 °C. Moreover, the treatment process of the reservoir rock with the catalyst is similar to typical treatments using surfactants. As a result, this approach can increase oil recovery, enable the development of hard-to-recover reserves, and significantly improve hydrocarbon displacement and flow to the surface.

Keywords: hard-to-recover reserves, hydrocarbons, catalysis, in-situ cracking, hydrocarbon conversion, fractional composition, catalyst, active sites, catalytically active mixture, hydrocracking, production intensification.

Н. В. Леонтєва, магістр, М. І. Фик, д-р техн. наук, доцент

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ ПЕРЕВАГ ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ПРОЄКТІВ ДДЗ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: перепрофілювання нафтогазових свердловин, геотермальна енергетика, геологічні умови, пластові температури, глибокі свердловини, моделювання теплових потоків, економічна ефективність, техніко-економічні параметри системи, геотермальні ресурси, геотермальні системи.

Вступ. Розвиток досліджень у сфері перепрофілювання нафтогазових свердловин для геотермальних проєктів має тривалу історію, що відображено у численних наукових працях. Атлас родовищ нафти і газу України [1] (Арсирій, Гошовський та інші, 1998) надав фундаментальні дані про геологічні умови, що є основою для подальших досліджень у цій галузі. Дослідження Кабишева, Шпака та інших (1987) [2] детально описали геологію та нафто-газоносність Дніпровсько-Донецької западини, що є ключовим регіоном для геотермальних проєктів.

Вендельштейн та Резванов (1978) [3] розробили геофізичні методи визначення параметрів нафто-газових колекторів, що стали основою для сучасних методів оцінки геотермального потенціалу. Колодій, Височанський та інші (1999) [4] дослідили гідро-геологічні передумови нафтогазоносності Північного борту Дніпровсько-Донецької западини, що є важливим для розуміння умов видобутку геотермальної енергії.

Звіт Тиндюка та інших (2004) [5] про пошукові сейсморозвідувальні роботи на Новомиколаївській площі надав практичні дані для оцінки геотермального потенціалу. Дослідження Aydin та Merey (2021) [6] показали потенціал виробництва геотермальної енергії з виснажених газових родовищ, що підтверджує економічну доцільність таких проєктів.

Cheng та інші (2013) [7] дослідили можливості генерації геотермальної енергії з використанням покинутих нафтових свердловин, що є важливим для розробки нових технологій. Garg та Combs (2010) [8] розробили методи оцінки геотермального потенціалу, що використовуються для моделювання та прогнозування ефективності систем.

Akin (2017) [9] провів оцінку геотермальних ресурсів поля Alaşehir, що є прикладом успішного використання геотермальної енергії. Sharma, Al Saedi та Kabir (2020) [10] розробили аналітичні моделі для оптимізації видобутку теплової енергії, що є важливим для підвищення ефективності геотермальних систем. Нарешті, дослідження Kohl, Salton та Rybach (2000) [11] надали дані про глибокі теплообмінні системи, що є основою для сучасних геотермальних проєктів.

В 2021–2024 рр. на базі НТУ «ХПІ» проведені дослідження окремих груп та одиночних свердловин щодо доцільності їх переведення із старих фондів вуглеводневих родовищ до геотермальних або вуглеводнево-геотермальних [12–14], що вказало на потребу подальших досліджень з комплексною оцінкою технолого-економічних переваг перепрофілювання нафтогазових свердловин для перспективних геотермальних проєктів з зони ДДЗ.

Вищезазначені дослідження поступово збільшували актуальність тематики перепрофілювання нафтогазових свердловин для геотермальних проєктів, спираючись на особливості виснажених родовищ видобувних регіонів та сучасні техніко-технологічні проєктні рішення, підтверджуючи суттєву економічну та технологічну доцільність таких рішень.

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою в оптимальному використанні існуючої інфраструктури, скороченні витрат на будівництво нових свердловин, а також забезпеченні екологічно чистої енергії для регіону та держави.

Розгляд результатів попередніх досліджень [1–14] послуговував формулюванню наступних задач досліджень:

Аналіз технологіко-економічних переваг перепрофілювання свердловин:

- Визначення геологічних умов Дніпровсько-Донецької западини, які сприяють видобутку геотермальної енергії.
- Оцінка пластових температур, глибини та дебіту свердловин для підтвердження перспективності проєкту.

Моделювання теплових потоків:

- Використання програмного забезпечення FEFLOW для розрахунку потоків теплової енергії в системі з дублетом свердловин.
- Визначення оптимальних параметрів роботи системи, оцінка теплових втрат та ризиків холодного прориву між свердловинами.

Економічна оцінка проєкту:

- Порівняння економічної вигоди перепрофілювання свердловин з будівництвом нових.
- Прогнозування інвестиційної окупності проєкту протягом прийнятного періоду часу, враховуючи річне виробництво теплової енергії та використання існуючої інфраструктури.

Метою цієї роботи є аналіз можливостей, переваг і викликів перепрофілювання нафтогазових свердловин у ДДЗ, з урахуванням технічних, економічних і екологічних аспектів за допомогою моделювання в програмі Feflow.

1. Аналіз поточного стану розробки нафтогазового родовища

1.1. Інформація про вибране родовище та свердловини

Родовище Термо-Н, розташоване в межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) (рис. 1.1), є одним із значущих нафтогазових об'єктів України, зокрема для забезпечення паливних ресурсів регіону та держави. Родовища цього регіону характеризуються різною глибиною залягання продуктивних горизонтів і значною обводненістю на пізніх стадіях експлуатації.

Перепрофілювання існуючих нафтогазових свердловин для видобутку геотермальних ресурсів передбачає ретельний аналіз та вибір способів їх експлуатації, виходячи з їхнього технічного стану, глибини залягання, температурних характеристик та загальної придатності для геотермальних цілей.

Найбільш перспективними продуктивними горизонтами за геотермальною характеристикою Термо-Н родовищі є візейські поклади – гор. В-17, 18, 22 та В-19-20в, гор. Т та гор. Д, у яких на відповідних глибинах від 3617–5007 м температура пласта становить від 103 °С до 127 °С (рис. 1.2), коефіцієнт пористості 0,11–0,19, пластові тиски 41–54 МПа. У літологічному розрізі також простежується послідовне чергування пісковиків, алевролітів і глинистих сланців, що створює багат шарову структуру з хорошими умовами для накопичення і збереження вуглеводнів, а також для можливого

видобутку геотермальних ресурсів. Пластові води Термо-Н родовища найбільш перспективні з точки використання геотермальної енергії (пластові температури (90-108-130 °С) виділено у башкирському, серпуховському, візейському та турнейському водонесних комплексах з глибинами залягання 3602–5238 м відносяться до хлоридно-хлоркальцієвого типу з досить високою мінералізацією (до 313 г/л). Початкові дебіти води знаходяться в межах від 1,2 м³/доб до 380 м³/доб. Активність вод низька, агресивні компоненти – відсутні. За результатами укрупненого геолого-технічного аналізу поточного стану рекомендуються як першочергові свердловини № Н-1, Л-2, Л-3, Л-4 під перепрофілювання.

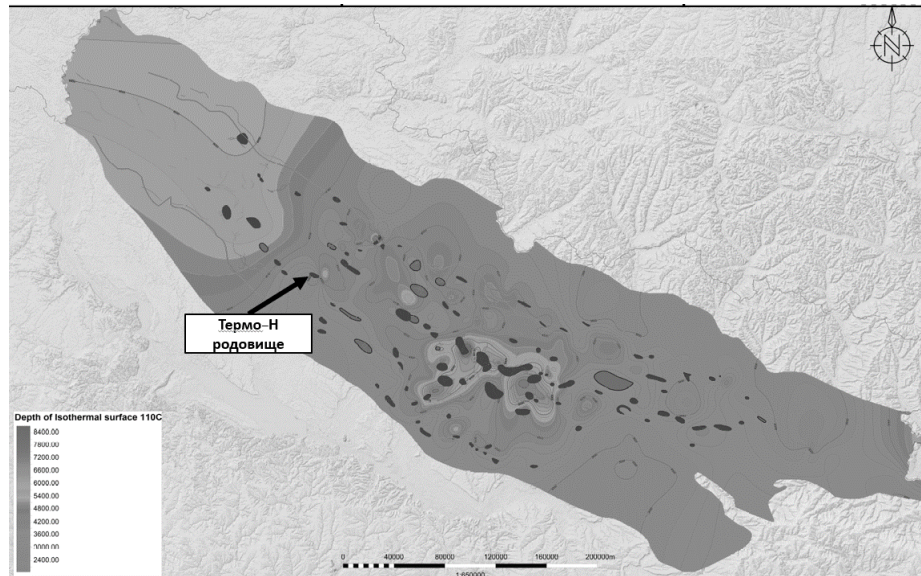


Рисунок 1.1 – Термальна карта Дніпро-Донецького басейну

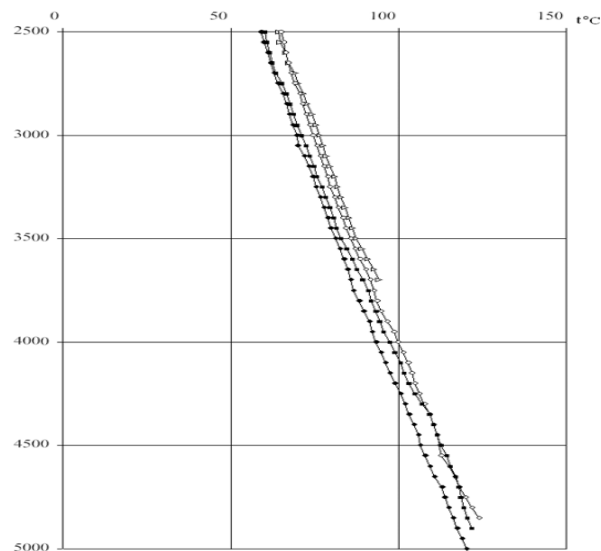


Рисунок 1.2 – Зміна температури з глибиною на Термо-Н родовищі

На основі попереднього аналізу родовища, де чимало свердловин мають високий рівень обводненості та знижений тиск, одним із першочергових об'єктів освоєння геотермальної енергії доцільно розглядати свердловину № Н-1, яка знаходиться на відста-

ні 350 м від Термо-Н УКПГ. На теперішній час, свердловина перебуваючи в діючому фонді працює незадовільно – інтенсивно обводнюється пластовою водою. У 2009 році проведено капітальний ремонт свердловини, а саме проробку торцевим фрезером до глибини 5160 м та проведення ГДС в інтервалі 3400–5140 м.

1.2 Вихідні данні, які було взято для моделювання

В симуляції Feflow було зазначено такі етапи створення моделі:

1. Побудувати кінцево-елементну сітку, придатну для геотермальних цілей, і перевірити її якість.
2. Побудувати просту 3D модель для геотермального моделювання щоб повністю параметризувати модель теплопередачі (матеріали та граничні умови)
3. Пов'язати нагнітальні та видобувні свердловини в контексті геотермальної відкритої системи, щоб запустити модель і зробити базову візуалізацію температури (2D, 3D і перерізи)
4. Перевірка результатів моделі.

Геотермальний резервуар знаходиться в районі з альтитудою 200 м над рівнем моря, представлений покрівлею пласту, резервуаром води та фундаментом на глибині 5200 м (рис. 1.3). Конфігурація системи буде представлена з двох груп: 1–2 видобувних свердловин і група 2–2 нагнітальних свердловин.

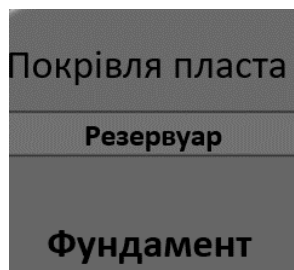


Рисунок 1.3 – Прошарки породи, для яких потрібні данні

Для створення моделі свердловин в Feflow, потрібні їх координати в прямокутній системі, тобто в метрах.

Далі потрібно знайти такі дані як теплопровідність ,теплоємність, пористість та проникність геотермального резервуару ,тобто трьох типів горизонтів(покрівля, резервуар, фундамент). Основні теплотехнічні дані наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні теплотехнічні дані одинарний інтервал

Шар	Теплопровідність (Вт/мК)	Теплоємність (об'ємна) (Дж/м ³ К)	Пористість	Проникність (м ²)
Покрівля пласта	1,32	1,6092	0,09	10 ⁻¹⁵
Резервуар	1,65	2,0	0,13	1,2x10 ⁻¹³
Фундамент	1,81	2,3	0,07	10 ⁻¹⁶

Гідравлічний напір приймаємо 500 м.

Також приймаємо геотермальний потік ,який становить 60 мВт/м².

Проте програма Feflow потребує цей параметр в інших одиницях, тому за допомогою формули переводимо з мВт/м² в Дж/м²/д:

$$\phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \rightarrow \frac{\partial T}{\partial z} = -\frac{\phi}{\lambda}, \quad (1.1)$$

де ϕ – геотермальний потік, λ – теплопровідність відповідно (покрівлі, резервуару та фундаменту).

І отримуємо результат – 5184 Дж/ м²/д.

Температура

Геотермальний потік у цьому районі оцінюється в 60 мВт/м². Враховуючи, що температура поверхні 15 °С, можна розрахувати вертикальний розподіл температури через різні значення геотермічного градієнта (табл. 1.2):

$$\phi \left(\frac{J}{m^2 d} \right) = \phi \left(\frac{W}{m^2} \right) \cdot 86400. \quad (1.2)$$

Таблиця 1.2 – Розрахунок температурного градієнта

Шар	λ (Вт/мК)	dT/dz (К/м)	Глибина(м)	Температура(°С)
Верх покрівлі	1,32	0,045	0	15
Верх резервуара	1,65	0,036	3900	101
Резервуар – 100 м від вершини	1,65	0,036	4000	104,6
Резервуар – 200 м від вершини	1,65	0,036	4100	108,2
Резервуар низ	1,65	0,033	4400	115,4
Фундамент	1,81	0,033	5200	131

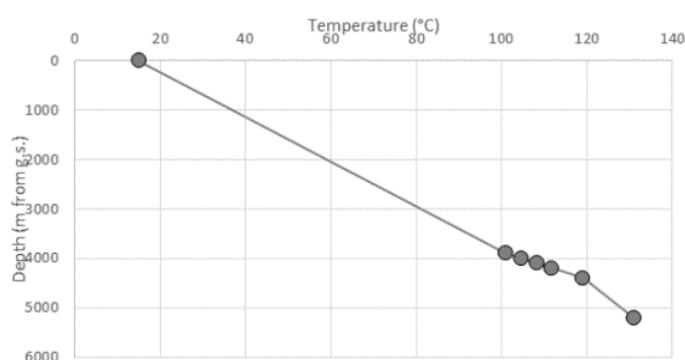


Рисунок 1.4 – Графік залежності температурного градієнта від глибини

Свердловини видобувають і закачують 30 л/с (близько 108 т/год) кожна (припустимо, що густина води статична). Очікується, що виробнича температура теплоносія буде близько 128 °С, а температуру ін'єкції встановлюють на 30 °С.

Гідравлічна провідність-швидкість рідини через пори та тріщини (sm/s). Залежить від проникності, ступеня насичення, густини та в'язкості рідини.

Як і очікувалося, FEFLOW не працює з проникністю k (м^2), але з гідравлічною провідністю K (м/с) так. Перетворення:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}, \quad (1.3)$$

де ρ (кг/м^3) – густина рідини, μ ($\text{кг/м}\cdot\text{с}$) – в'язкість рідини, а $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення сили тяжіння. При еталонній температурі $T_0 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ вода має $\rho = 999,973 \text{ кг/м}^3$ і $\mu = 1,124 \cdot 10^{-3} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$. Гідравлічна провідність встановлена за замовчуванням у м/день, тому переводимо її по за формулою:

$$K\left(\frac{\text{м}}{\text{д}}\right) = K\left(\frac{\text{м}}{\text{с}}\right) \cdot 86400. \quad (1.4)$$

Отже, гідравлічна провідність становитиме (табл. 1.3):

Таблиця 1.3 – Гідравлічна провідність для 3-х прошарків

Шар	Гідравлічна провідність(м/д)
Покришка	$7,57 \cdot 10^{-4}$
Резервуар	$9,08 \cdot 10^{-2}$
Фундамент	$7,57 \cdot 10^{-5}$

Тож після визначення вхідних даних ,проводимо моделювання в програмі.

2. Результати досліджень

2.1. Результати моделювання в програмі Feflow

Проведене моделювання в програмному забезпеченні FEFLOW дозволило оцінити теплові та гідродинамічні характеристики відкритої геотермальної системи на основі виснажених газових свердловин Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ).

На рис. 2.1 показано розподіл геотермічного градієнта до проведення симуляції з часом, це зроблено для кращого розуміння розподілу температури та її змінності у часі.

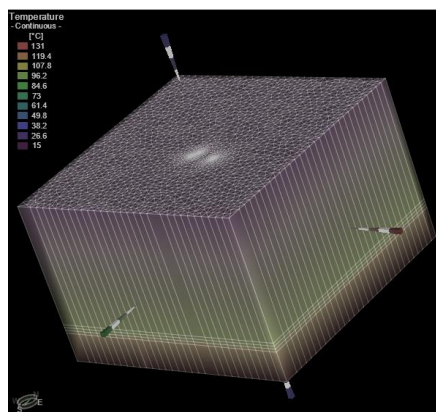


Рисунок 2.1 – Розподіл геотермічного градієнта по 3-х прошарках моделі

Задавши всі вхідні дані у Програмному середовищі Feflow, маємо змогу змоделювати роботу проектного дуплету свердловин впродовж 20 років.

Отже, в результаті прорахунку роботи з часом графік зміни температури (рис. 2.2) показує що ,температура в свердловинах Н-1 та Л-4 майже не знижується, дуже хороший результат, проте треба ще змінити відстань між свердловиною новою та перепрофільованою для кращого результату, тож ця система потребує побудови нової свердловини та більш детального дослідження геології пласту аби вийшло видобувати енергію ефективно.

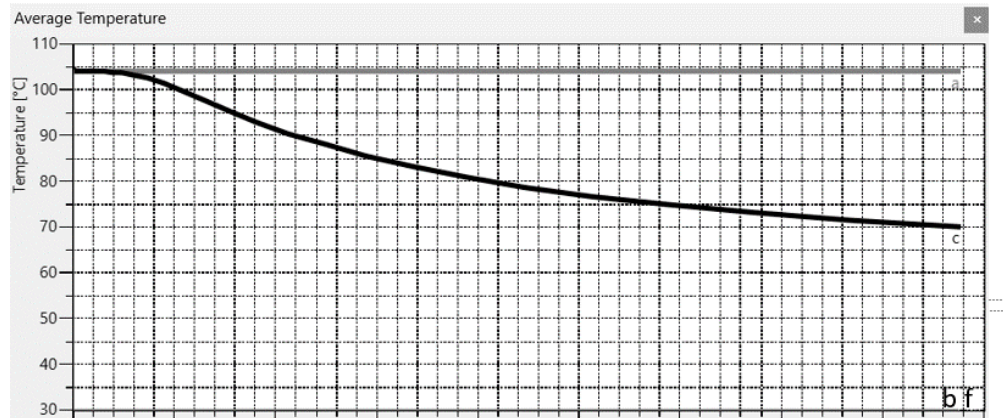


Рисунок 2.2 – Робота свердловин з часом

(Видобувні – свердловина Н-1 – крива позначена літерою а, свердловина Л-2 – крива позначена літерою с. Нагнітальні свердловини Л-3 та Л-4 позначені кривими b та f внизу)

Щодо свердловин Л-2 та Л-3 то на графіку (рис. 2.2) показується стрімкий тренд зменшення температури через незначну відстань між стовбурами, тому в даному випадку перепрофілювання не є доцільним. Аналіз показав, що зменшення відстані між нагнітальною і видобувною свердловинами спричиняє швидший "холодний прорив" і знижує ефективність теплообміну. Для збереження ефективності системи рекомендується збільшити відстань між свердловинами або змінити схему закачування. Тому в даній роботі далі їх розгляд проводитись не буде.

Нагнітальні свердловини Л-3 та Л-4 мають постійну накладену умову - температура закачки 30 °С ,вказана температура є заданою та незмінною впродовж роботи системи свердловин ,проте її можна змінювати.

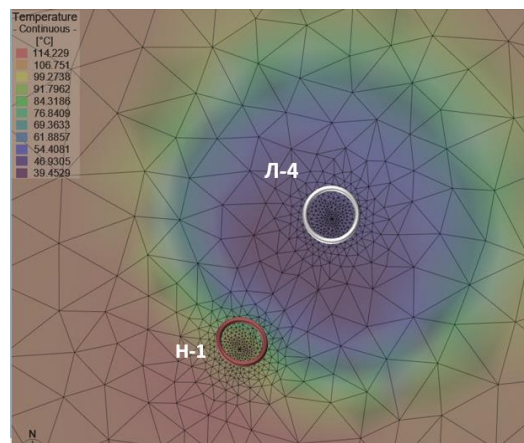


Рисунок 2.3 –Робота свердловин Н-1 та Л-4 з часом, зміна температури

На рис. 2.3 більш детально видно як будуть працювати свердловини Н-1 та Л-4, закачування холодної води дещо охолоджує пласт проте при оптимізації дебіту та зміни відстані між стовбурами свердловин, результат є задовільним.

Можна зробити висновок з моделі – впродовж 20 років роботи системи не було зафіксовано значного зниження дебіту продуктивної свердловини, що вказує на стабільність роботи резервуара та його гідравлічних характеристик.

Тож, з результатів моделювання випливає, що: глибина свердловин є достатньою для перепрофілювання та видобутку геотермальних ресурсів. Температурна характеристика системи дала чітку картинку того що буде відбуватися зі свердловинами впродовж проектного терміну роботи. Моделювання підтвердило, що поєднання перепрофілюваних і нових свердловин є ефективним рішенням для розробки геотермальних систем. Подальші дослідження та оптимізація розташування свердловин сприятимуть підвищенню рентабельності і стабільності таких проектів.

2.2. Економічна оцінка та можливість перепрофілювання свердловин Н-1 та Л-4

Обчислення масового потоку (m):

$$m = \rho \cdot V. \quad (2.1)$$

Дебіт: 2592 м³/добу(30л/с), $\rho=0,999$ кг/л, тож – зводимо результат в табл. 2.1

Таблиця 2.1 – Доступна теплова потужність

Масовий потік теплоносія (кг/с)	29,97
Об'ємний дебіт(літр/с)	30
Густина (кг/літр)	0,999
Теплоємність геофлюїду (кДж/кг/К)	4,178
Доступна теплова потужність РТН(кВт)	12,272

Розрахунок обсягів енергії, що може бути отримана за допомогою системи

Теплова енергія:

Переведення потужності в Гкал/год:

Якщо теплова потужність станції вказана в кіловатах ($Q_{ном}$, кВт), переведемо її у Гкал/год:

$$1 \text{ кВт} = 0.86 \text{ Гкал/год}$$

Розрахунок тепла за рік:

$$Q_{рік} = Q_{ном} \cdot 8760 \cdot K_{викор}. \quad (2.2)$$

- Теплова потужність станції ($Q_{ном}$): 12272 кВт.
- Коефіцієнт використання потужності ($K_{викор}$): 0.75.

$$Q_{рік} = 10,55 \cdot 8760 \cdot 0.75 = 69,339.2 \text{ Гкал.}$$

Тобто річний виробіток теплової енергії орієнтовно 69,340 Гкал за умови стабільної роботи геотермальної системи та коефіцієнта використання теплової потужності 75 %, при дебіті 2592 м³/добу і температурній різниці 98 °С (128 °С–30 °С).

Ці параметри свідчать про високу ефективність системи в умовах Дніпровсько-Донецької западини. У системі відкритого циклу робота свердловин організована наступним чином:

Видобувна свердловина: забезпечує постійний відбір теплоносія з високою температурою, що передається безпосередньо для використання. Нагнітальна свердловина: повертає охолоджений теплоносій назад у геотермальний резервуар для підтримки його гідродинамічних властивостей.

Для уникнення "холодного прориву" та стабільної роботи резервуара важливо забезпечити: Оптимальну відстань між свердловинами: мінімальна рекомендована відстань – 2500 м.

Регулювання дебіту: контроль швидкості закачування охолодженого теплоносія для уникнення надмірного охолодження продуктивної зони.

Моніторинг параметрів: систематичний контроль температури закачування, тиску та рівня теплоносія.

Пропозиції щодо перепрофілювання свердловин

Температура пластових вод: 120–130 °С дозволяє забезпечити ефективний тепловий потік.

Стан обсадних колон: цілісність обсадних труб Ø426 мм та Ø324 мм підтверджує можливість їхнього використання після додаткової ревізії.

Дебіт: за попередніми оцінками, продуктивність свердловин може сягати 20–30 л/с, залежно від гідродинамічних властивостей пласта.

Проблемні аспекти для подальшого дослідження:

1. Висока мінералізація води викликає необхідність використання корозійностійкого обладнання.
2. Потреба у додатковій ізоляції: необхідно цементувати зони з низькою проникністю, щоб уникнути втрат теплоносія. Ліквідація міжколонних перетоків.
3. Відстань між свердловинами: для запобігання "холодному прориву" необхідно оптимізувати схему розташування свердловин.

Технічна адаптація свердловини:

– провести цементування затрубного простору для додаткової ізоляції неізольованих зон. Замінити НКТ на корозійностійкі труби Ø60,3/73 мм для забезпечення довговічності системи у свердловині Н-1. Встановити високотемпературні занурювальні насоси для забезпечення стабільного дебіту. Провести перфорацію у найгарячіших інтервалах пласта для максимального відбору геотермального ресурсу.

– покращити роботу системи «Свердловина-пласт»: Оптимізація дебіту для забезпечення максимальної тепловіддачі без втрати тиску в продуктивній зоні. Провести ревізію устьового обладнання. Заміряти поточний вибір свердловин та перевірити герметичність обсадних колон.

Автоматизація (пропозиції):

– встановити системи моніторингу та управління для оперативного контролю роботи системи та запобігання аварійним ситуаціям.

На рис. 2.4 показана Технологія експлуатації теплового дуплета, яка запропонована для використання у системі відкритого циклу зі свердловинами Н-1 та Л-4. Принцип роботи:

- екстракція та повторне закачування рідини;

- теплоносій – геотермальний;
- швидкість потоку залежить від петрофізичних властивостей гірських порід і може регулюватися дросельним клапаном на гирлі свердловини.

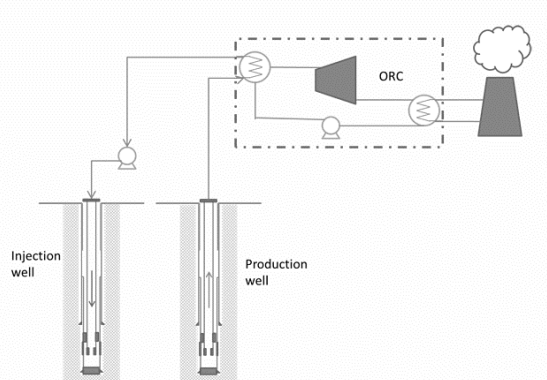


Рисунок 2.4 – Технологія експлуатації геотермального дуплета

Отже, запропоновані рекомендації стосовно перепрофілювання свердловини. Запропоновані методи перепрофілювання дозволяють забезпечити стабільний видобуток геотермальних ресурсів з перспективою інтеграції в національну енергетичну систему.

В даній таблиці представлені витрати на перепрофілювання свердловини Н-1 та будівництво нової Л-4. (Ціни були взяті в євро, проте переведені за курсом НБУ на дату проведення розрахунків)

Таблиця 2.2 – Економічні витрати для варіантів перепрофілювання або будівництва нової свердловини

Категорія витрат	Перепрофілювання	Будівництво нової
Геофізичні дослідження	3,000,000 грн.	50,000,000 грн.
Ремонтно-ізоляційні роботи	40,000,000,грн.	-
Буріння (5000 м)	-	290,000,000 грн.
Обсадні труби та цементування	5,000,000 грн.	40,000,000 грн.
Геотермальне обладнання (в.т.ч. теплообмінник)	10,000,000 грн.	60,000,000 грн.
Система циркуляції (насоси, труби)	8,000,000 грн.	40,000,000 грн.
Автоматизація та контроль	5,000,000 грн.	50,000,000 грн
Додаткові витрати	4,000,000 грн.	40,000,000 грн
Всього	75 млн грн.	570 млн грн.

Проект перепрофілювання свердловин має високі початкові витрати, що зумовлено необхідністю закупівлі корозійностійкого обладнання та проведенням підготовчих робіт. Проте операційні витрати є відносно невеликими завдяки низьким енергетичним витратам системи.

На рис. 2.5 представлено розрахунок економіки – витрати 570 млн на буріння та облаштування нової свердловини. Для спрощення розрахунків приймаємо, що капітальні витрати реалізуються впродовж першого року проекту. Ставка дисконтування – 17 % річних.

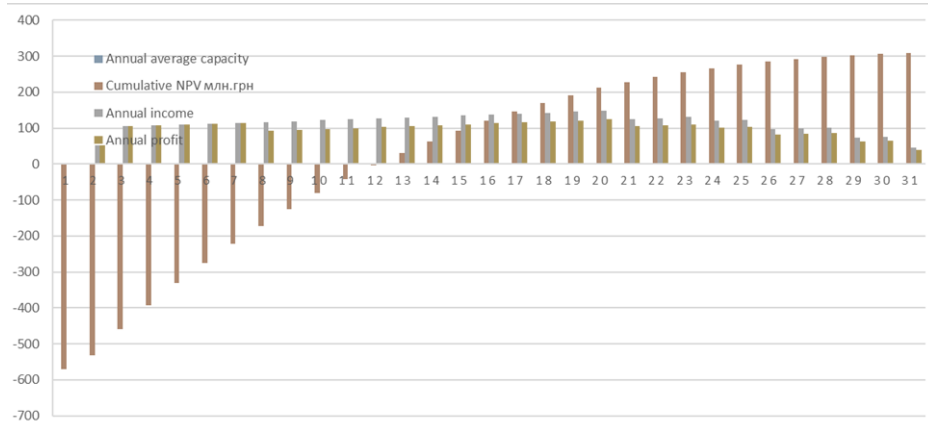


Рисунок 2.5 – Розрахунок NVP при будівництві нової свердловини(CAPEX 570 млн грн)

Тож, згідно даного моделювання, даний проект окупний за 11 років.

Згідно умови продажу теплової енергії за поточним тарифом з поступовим зростанням ціни на рівень інфляції 5 % на рік.

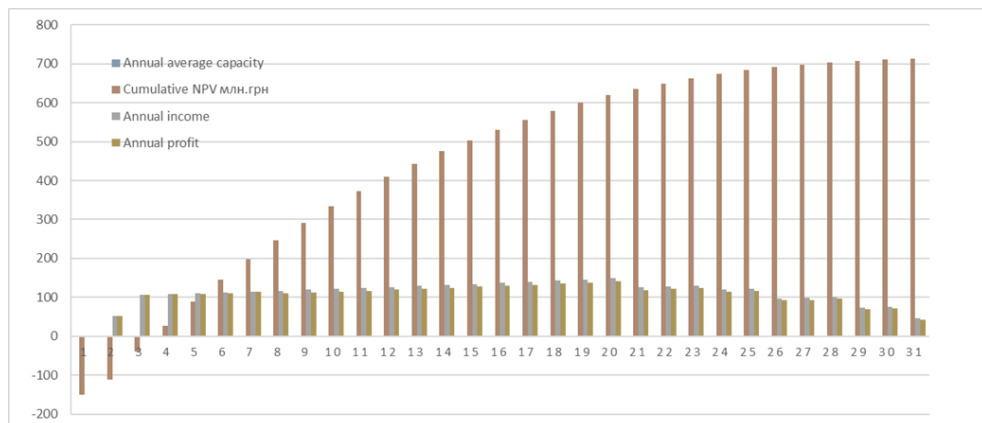


Рисунок 2.6 – Розрахунок NVP з умови перепрофілювання свердловин(CAPEX 150 млн грн.)

Дві свердловини x 75 млн кожна = 150 млн показує окупність на четвертий рік реалізації проекту виходячи із попередньої умови.

Формула для розрахунку доходу:

$$D = Q_{\text{рік}} \cdot T_{\text{тариф}}, \quad (2.3)$$

де D – річний дохід теплостанції (грн), $Q_{\text{рік}}$ – річна кількість тепла, виробленого станцією (Гкал), $T_{\text{тариф}}$ – тариф на продаж теплової енергії (грн/Гкал).

$$D = 69,340 \cdot 1500 = 104\,000\,881,6 \text{ грн.}$$

Оцінка витратної частини показала, що перепрофілювання виснажених нафтогазових свердловин є економічно доцільним рішенням для видобутку геотермальних ресурсів. Завдяки використанню існуючої інфраструктури вдалося значно зменшити витрати порівняно з бурінням нових свердловин. Геотермальне тепло, отримане внаслідок експлуатації дуплета на Термо-Н родовищі, має великий потенціал для комерційного використання в Україні.

В результаті отримано наступну потенційну потужність видобутку геотермальної енергії (рис. 2.7).

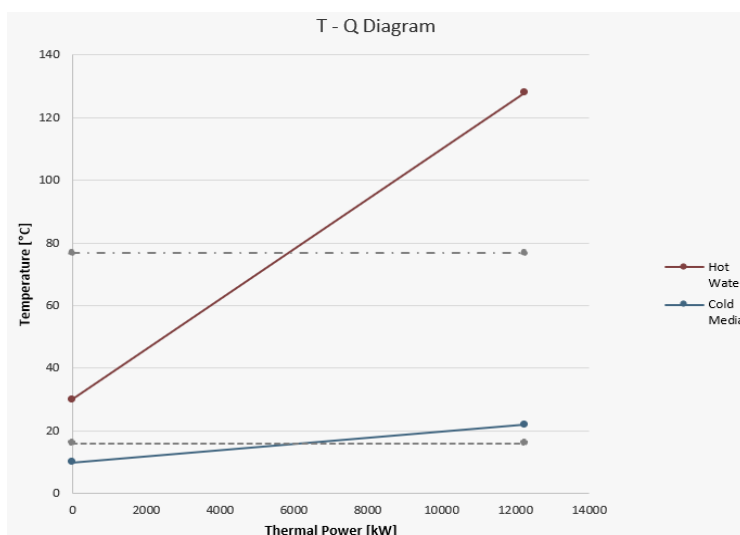


Рисунок 2.7 – Результати оціночних розрахунків видобутку геотермальної енергії

Обговорення результатів дослідження та розроблені рекомендації абзац табуляція

Дослідження підтвердило високу актуальність перепрофілювання виснажених нафтогазових свердловин для розвитку геотермальної енергетики в Україні. Зокрема, свердловин Н-1 та Л-4 для видобутку геотермальної енергії. Геологічні умови Дніпровсько-Донецької западини, пластові температури на рівні 120–130 °С, глибина понад 5000 м та високий дебіт до 2592 м³/добу забезпечують перспективність реалізації проєкту. Це дозволяє раціонально використовувати існуючу інфраструктуру, знижуючи капітальні витрати на будівництво нових свердловин.

Проведене моделювання в програмному забезпеченні FEFLOW дозволило:

- розрахувати потоки теплової енергії для відкритої системи з дублетом свердловин (одна нагнітальна та одна видобувна);
- визначити оптимальні параметри роботи системи, зокрема: дебіт, температуру теплоносія та термін служби системи;
- оцінити теплові втрати та ризики холодного прориву між свердловинами.

Виконані розрахунки підтвердили економічну вигоду перепрофілювання свердловин у порівнянні з будівництвом нових. Також було спрогнозовано інвестиційну окупність проєкту протягом прийняттого періоду часу, враховуючи річне виробництво теплової енергії та використання існуючої інфраструктури.

Для підвищення ефективності геотермальних систем у ДДЗ рекомендовано:

- використання сучасних матеріалів для зменшення втрат тепла в свердловинах;
- розширення геотермальних мереж для забезпечення тепlopостачання промислових і комунальних об'єктів;

- розробку детальних інструкцій з моніторингу та обслуговування системи.

Отримані результати можуть бути основою для розширення використання геотермальної енергії на інших територіях України з подібними геологічними умовами. Подальші дослідження слід спрямувати на інтеграцію геотермальної енергії з іншими відновлюваними джерелами енергії.

Висновки

1. Перспективність перепрофілювання свердловин: Геологічні умови Дніпровсько-Донецької западини, пластові температури на рівні 120–130 °С, глибина понад 5000 м та високий дебіт до 2592 м³/добу забезпечують перспективність реалізації проєкту з видобутку геотермальної енергії.

2. Економічна вигода: Перепрофілювання свердловин Н-1 і Л-4 коштує 150 млн грн і окуповується за 4 роки, тоді як буріння нової свердловини вартістю 570 млн грн окупається лише за 11 років. Це підтверджує доцільність використання існуючої інфраструктури.

3. Оптимальні параметри системи: Моделювання в програмному забезпеченні FEFLOW дозволило розрахувати потоки теплової енергії для відкритої системи з дублетом свердловин, визначити оптимальні параметри роботи системи, зокрема дебіт, температуру теплоносія та термін служби системи.

4. Моделювання та прогнозування з урахуванням розроблених рекомендацій: Моделювання в програмному середовищі FEFLOW показало, що перепрофілювання свердловин Н-1 і Л-4 забезпечує стабільний видобуток теплової енергії (69340 Гкал/рік) із мінімальними тепловими втратами протягом 20 років експлуатації.

Література

1. Арсірій Ю. О., Гошовський С. В. та ін. Атлас родовищ нафти і газу України. Львів, 1988. С. 139–145.
2. Кабышев Б. К., Шпак П. Ф., Билык О. Д. та ін. Геология и нефтегазоносность Днепровско-Донецкой впадины. Нефтегазоносность / АН УССР, Институт геологических наук. Киев : Наукова думка, 1987. С. 95–117.
3. Щелкачев В. Н. Анализ параметров подобия гидравлики. *Нефтяное хозяйство*. 1951. № 7. С. 28–33.
4. Колодій В., Височанський І. та ін. Гідрогеологічні передумови нафтогазоносності Північного борту Дніпровсько-Донецької западини. *Геологія і геохімія корисних копалин*. 1999. №1 (106). С. 21–29.
5. Тиндюк О. В. та ін. Звіт про пошукові сейсморозвідувальні роботи МСГТ на Новомиколаївській площі. Розсушенці : СУГРЕ, 2004. С. 69–75.
6. Aydin H., Merey S. Potential of geothermal energy production from depleted gas fields: A case study of Dodan Field, Turkey. *Renewable Energy*. 2021. Vol. 164. P. 1076–1088.
7. Cheng W. L., Li T. T., Nian Y. L., Wang C. L. Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. *Energy*. 2013. Vol. 59. P. 248–254.
8. Garg S. K., Combs J. Appropriate use of USGS volumetric “heat in place” method and Monte Carlo calculations. *Proceedings 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, February, 2010. Stanford University. Stanford, California, USA, 2010. P.48.

9. Akin S. Geothermal Resource Assessment of Alaşehir Geothermal Field. *42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California. 2017. P. 56–65.
10. Sharma P., Al Saedi A. Q., Kabir C. S. Geothermal energy extraction with wellbore heat exchanger: Analytical model and parameter evaluation to optimize heat recovery. *Renewable Energy*. 2020. Vol. 166. P. 1–8.
11. Kohl T., Salton M., Rybach L. Data Analysis of the Deep Borehole Heat Exchanger Plant Weissbad (Switzerland). *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28–June 10, 2000. Tohoku, Japan, 2000. P. 3459–3464.
12. Fyk M. I., Biletskyi V. S., Abbood M., Desna N. A. Specifying the Methods to Calculate Thermal Efficiency of a Dual Production Well System “Fluid-Geoheat”. *Petroleum & Coal*. 2022. P. 62.
13. Михайленко А. А., Фик М. І. Геотермальний потенціал переведених нафтогазових свердловин Дніпровсько-Донецького басейну: можливості та виклики в контексті нанотехнологій. *Сучасні технології переробки паливних копалин*. 2024. С. 142.
14. Fyk M. I., Biletskyi V. S., Desna N. A. A Methodology for Calculating the Productivity of A Hydrocarbon-Geothermal Well. *Petroleum & Coal*. 2021. P. 63.

Bibliography (transliterated)

1. Arsiriy, Y. O., Goshovsky, S. V. et. al. (1988). Atlas of oil and gas fields of Ukraine. Lviv. P. 139–145.
2. Kabyshev B. K., Shpak P. F., Bilyk O. D. et. al. (1987). Heolohiya y neftehazonosnost Dneprovsko-Donetskoi vpadyny. *Neftehazonosnost / AN USSR, Ynstytut heolohycheskykh nauk*. Kyev: Naukova dumka. P. 95–117.
3. Shchelkachev V. N. (1951). Analyz parametrov podobyia hydryavlyky. *Neftianoe khoziaistvo*, 7, 28–33.
4. Kolodii V., Vysochanskyi I. et. al. (1999). Hidroheolohichni peredumovy naftohazonosnosti Pivnichnoho bortu Dniprovsko-Donetskoi zapadyny. *Heolohiia i heokhimiia korysnykh kopalyn*, 1(106), 21–29.
5. Tyndiuk O. V. et. al. (2004). Zvit pro poshukovi seismorozviduvalni roboty MSHT na Novomykolaivskii ploshchi. *Rozsushentsi : SUHRE*, 69–75.
6. Aydin H., Merey S. (2021). Potential of geothermal energy production from depleted gas fields: A case study of Dodan Field, Turkey. *Renewable Energy*, 164, 1076–1088.
7. Cheng W. L., Li T. T., Nian Y. L., Wang C. L. (2013). Studies on geothermal power generation using abandoned oil wells. *Energy*, 59, 248–254.
8. Garg S. K., Combs J. (2010). Appropriate use of USGS volumetric “heat in place” method and Mon-te Carlo calculations. *Proceedings 34th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, February, 2010. Stanford, California, USA. P. 48.
9. Akin S. (2017). Geothermal Resource Assessment of Alaşehir Geothermal Field. *42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, California, 2017. P. 56–65.
10. Sharma P., Al Saedi A. Q., Kabir C. S. (2020). Geothermal energy extraction with wellbore heat exchanger: Analytical model and parameter evaluation to optimize heat recovery. *Renewable Energy*, 166, 1–8.

11. Kohl T., Salton M., Rybach L. (2000). Data Analysis of the Deep Borehole Heat Exchanger Plant Weissbad (Switzerland). *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu – Tohoku, Japan, May 28–June 10, 2000. (pp. 3459–34640). Tohoku, Japan.

12. Fyk M. I., Biletskyi V. S., Abbood M., Desna N. A. (2022). Specifying the Methods to Calculate Thermal Efficiency of a Dual Production Well System “Fluid-Geoheat”. *Petroleum & Coal*, 62.

13. Mykhailenko A. A., Fyk M. I. (2024). Neotermalnyi potentsial perevedenykh naftohazovykh sverdlovyn Dniprovsko-Donetskoho baseinu: mozhlyvosti ta vyklyky v konteksti nanotekhnolohii. *Suchasni tekhnolohii pererobky palnykh kopalyn*, 142.

14 Fyk M. I., Biletskyi V. S., Desna N. A. (2021). A Methodology for Calculating the Productivity of A Hydrocarbon-Geothermal Well. *Petroleum & Coal*, 63.

УДК 622.279.5

Н. В. Леонтьєва, М. І. Фик

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ТЕХНОЛОГО-ЕКОНОМІЧНИХ ПЕРЕВАГ ПЕРЕПРОФІЛЮВАННЯ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ПРОЄКТІВ ДДЗ

Актуальність теми дослідження зумовлена потребою в оптимальному використанні існуючої інфраструктури, скороченні витрат на будівництво нових свердловин, а також забезпеченні екологічно чистої енергії для регіону та держави.

Аналіз технологічно-економічних переваг перепрофілювання свердловин: визначення геологічних умов Дніпровсько-Донецької западини, які сприяють видобутку геотермальної енергії, оцінка пластових температур, глибини та дебіту свердловин для підтвердження перспективності проекту, моделювання теплових потоків, використання програмного забезпечення FEFLOW для розрахунку потоків теплової енергії в системі з дублетом свердловин, визначення оптимальних параметрів роботи системи, оцінка теплових втрат та ризиків холодного прориву між свердловинами, прогнозування інвестиційної окупності проекту протягом прийняттого періоду часу, враховуючи річне виробництво теплової енергії та використання існуючої інфраструктури.

Метою цієї роботи є аналіз можливостей, переваг і викликів перепрофілювання нафтогазових свердловин у ДДЗ, з урахуванням технічних, економічних і екологічних аспектів за допомогою моделювання в програмі Feflow.

Дослідження окреслило технологічно-економічні переваги та підтвердило високу актуальність перепрофілювання споруджених раніше нафтогазових свердловин для розвитку геотермальної енергетики об'єктів ДДЗ в Україні. Зокрема, свердловин Н-1 та Л-4 для видобутку геотермальної енергії. Геологічні умови Дніпровсько-Донецької западини, пластові температури на рівні 120–130 °С, глибина понад 5000 м та високий дебіт до 2592 м³/добу забезпечують перспективність реалізації проекту. Проведене моделювання в програмному забезпеченні FEFLOW дозволило розрахувати потоки теплової енергії для відкритої системи з дублетом свердловин, визначити оптимальні параметри роботи системи, оцінити теплові втрати та ризики холодного прориву між свердловинами.

нами. Виконані розрахунки підтвердили економічну вигоду перепрофілювання свердловин у порівнянні з будівництвом нових. Також було спрогнозовано інвестиційну окупність проекту протягом прийнятного періоду часу близько 4 років, враховуючи річне виробництво теплової енергії та використання існуючої інфраструктури.

N. V. Leontieva, M. I. Fyk

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF TECHNOLOGICAL AND ECONOMIC ADVANTAGES OF OIL AND GAS WELLS RE-PROFILING FOR GEOTHERMAL PROJECTS

The relevance of the research topic is due to the need for optimal use of existing infrastructure, reducing costs for the construction of new wells, as well as providing environmentally friendly energy for the region and the state.

Analysis of the technological and economic advantages of reprofiling wells: determining the geological conditions of the Dnieper-Donets Basin, which contribute to the production of geothermal energy, assessing reservoir temperatures, depth and flow rates of wells to confirm the project's prospects, modeling heat flows, using FEFLOW software to calculate heat energy flows in a system with a doublet of wells, determining the optimal parameters of the system's operation, assessing heat losses and risks of cold breakthrough between wells, predicting the project's investment payback over an acceptable period of time, taking into account the annual production of heat energy and the use of existing infrastructure.

The purpose of this work is to analyze the opportunities, advantages and challenges of reprofiling oil and gas wells in the DDZ, taking into account technical, economic and environmental aspects using modeling in the Feflow program.

The study outlined the technological and economic advantages and confirmed the high relevance of re-profiling previously constructed oil and gas wells for the development of geothermal energy at the DZ facilities in Ukraine. In particular, wells H-1 and L-4 for geothermal energy production. The geological conditions of the Dnipro-Donetsk Basin, reservoir temperatures of 120–130 °C, a depth of more than 5000 m and a high flow rate of up to 2592 m³/day ensure the prospects for project implementation. The modeling performed in the FEFLOW software allowed us to calculate the heat energy flows for an open system with a duplicate well, determine the optimal system parameters, and assess heat losses and risks of cold breakthrough between wells. The calculations confirmed the economic benefits of re-profiling wells compared to building new ones. The investment payback period of the project was also predicted to be about 4 years, taking into account the annual heat production and the use of existing infrastructure.

В. Б. Байрачний, канд. техн. наук, професор, О. В. Адашевський, аспірант,
А. О. Сакун, д-р філософії, А. О. Литвин, д-р філософії, В. С. Бутко, асистент

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПИЛЕНOSTІ ПОВІТРЯ ТВАРИННИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: тваринницькі комплекси, комбікорм, тверді органічні відходи кондитерських виробництв, запиленість повітря, гігієнічні норми, параметри мікроклімату, стає поведження

Вступ. Тваринництво, як сектор сільського господарства, відіграє важливу роль у продовольчій безпеці країни, забезпечуючи населення високоякісними та поживними харчовими продуктами великим вмістом білку. Для отримання продуктів тваринництва, які відповідають усім санітарно-гігієнічним та безпековим вимогам, важливими є наступні фактори:

- безпечні та збалансовані корми протягом всього життя тварин;
- дотримання параметрів мікроклімату при утриманні тварин;
- своєчасне ветеринарне втручання за потреби;
- високоякісний генетичний матеріал.

Серед основних параметрів мікроклімату, ретельне дотримання яких є важливим для стійкого поголів'я тварин та їх нормального розвитку, є температура, вологість та вміст газів та запиленість [1].

Використання різноманітних комбікормів для годівлі тварин є виправданим з точки зору можливості забезпечити збалансоване харчування та можливості точного регулювання раціону тварин в залежності від кінцевих потреб – соковитість та інші споживчі характеристики м'яса [2, 3], розміру та ваги яєць [4], молочність корів [5] тощо.

Одним з перспективних напрямків сталого поведження з твердими органічними відходами кондитерських виробництв є їх введення в якості складових до комбікормів [6, 7]. Всі комбікорми поділяються на три великих групи: сухі, гранульовані та рідкі. Найдешевші та найпростіші у виготовленні є сухі комбікорми, які можна виготовляти простим змішуванням компонентів без впливу високої температури на типовому обладнанні. Тверді органічні відходи кондитерських виробництв на сучасному етапі сталого поведження з ними найчастіше вводять саме у сухі корми. В процесі виготовлення сухих комбікормів, а також під час їх зберігання та транспортування, у повітря робочих приміщень, а також до атмосфери потрапляє дрібнодисперсний пил органічного походження з розміром частинок PM_{10} та $PM_{2,5}$. Джерелом його утворення є основні складові комбікормів рослинного походження, такі як пшениця, жито, ячмінь, овес, кукурудза. Відповідно, такий пил може бути класифіковано як зерновий, який до того ж є вибухонебезпечним [8, 9]. При введенні до складу комбікормів твердих органічних відходів кондитерських виробництв, особливо залишків готової продукції, наприклад печива, вони також стають джерелом пилу органічного походження. У приміщеннях для утримання свійських тварин в цілому утворюється небезпечна суміш пилу, до якого окрім зернового пилу від сухих комбікормів входить фекальний пил, пил від пір'я та хутра тварин, мінеральний пил від матеріалів приміщень. При дослідженні вміст пилу у

приміщеннях тваринницьких комплексів авторами [10] було встановлено, що концентрація пилу PM_{10} становить $53,72 \text{ мг/м}^3$, тоді як рекомендована ВООЗ концентрація пилу PM_{10} не повинна перевищувати 45 мг/м^3 ; концентрація пилу $PM_{2,5}$ становить $36,54 \text{ мг/м}^3$, тоді як рекомендована ВООЗ концентрація пилу $PM_{2,5}$ не повинна перевищувати 15 мг/м^3 .

Метою роботи є дослідження запиленості повітря різних типів тваринницьких комплексів в залежності від типу комбікорму.

Матеріали та методика досліджень. У даному дослідженні використовували сухий комбікорм власної рецептури, до складу якого входило 10 мас.% твердих органічних відходів кондитерських виробництв (вафлі з жировою начинкою), а також пшениця (15 мас.%), кукурудза (35 мас.%), соняшникова макуха (10 мас.%) та інші поживні компоненти (ВРК), а також стандартний сухий комбікорм, який не містить твердих органічних відходів кондитерських виробництв (СК).

Для оцінки запиленості повітря у приміщеннях для зберігання комбікормів та у приміщеннях для утримання й годівлі свійських тварин та птиці використовували гравіметричний (ваговий) метод та експрес метод з використанням портативного пристрою.

Ваговий метод заснований на різниці маси фільтрів до та після проходження через них повітря визначеного об'єму. Для проходження повітря використовували електроаспіратор та фільтри марки АФА-ВП-10, розрахунки проводились згідно стандартної методики [11].

В якості портативного пристрою використовували тестер запиленості повітря Walcom HT-9600, який використовує лазерний принцип. Даний прилад дозволяє визначити окремо концентрацію частинок пилу $PM_{2,5}$ та PM_{10} , що неможливо ваговим методом.

Вимірювання запиленості проводили у фермерських господарствах, які відносяться до середніх, та в індивідуальних господарствах в харківській області в 2024 році.

Обговорення результатів. Загальна безпечна запиленість повітря у приміщеннях для утримання свійських тварин міститься у зоогігієнічних вимогах [12]. Недоліком даних вимог є нормування запиленості повітря без ідентифікації часток пилу за походженням, хімічним складом та розміром. Аналіз даних рис.1 свідчить, що верхня межа допустимої концентрації пилу відрізняється в залежності від виду свійських тварин, а особливо від їх віку. Найнижча допустима концентрація пилу повинна буди у приміщеннях для курчат-бройлерів віком 1–4 тижні та для вівців будь-якого віку – не вище $0,5 \text{ мг/м}^3$ [12]. Допустима концентрація пилу зернового для людей у повітрі робочої зони становить 4 мг/м^3 , середньодобова ГДК у повітрі населених пунктів – $0,03 \text{ мг/м}^3$ [13].



Рисунок 1 – Допустима концентрація пилу у приміщеннях для утримання свійських тварин

Великі та середні – за кількістю поголів'я – тваринні комплекси, як правило, мають свої власні приміщення для виготовлення сухих комбікормів. У таких цехах чи приміщеннях відбувається безпосередньо змішування компонентів комбікормів за певною рецептурою з компонентів, які зберігаються на складах. Як правило, на свинофермах шляхом змішування компонентів готується порція комбікорму на 1 добу годування, на птахофабриках середнього та малого розміру можуть готувати комбікорм на кілька днів. Гранульовані комбікорми переважно виготовляються на комбікормових заводах та транспортуються безпосередньо до тваринницьких комплексів, де зберігаються певний проміжок часу. Таким чином, додаткове пилове навантаження на навколишнє природне середовище при використанні сухих комбікормів є більш локалізованим, оскільки відсутня стадія транспортування.

У приміщеннях для виготовлення сухих комбікормів згідно результатів досліджень (табл. 1) спостерігається запиленість повітря на рівні 22–24 мг/м³, за своїм походженням там переважає пил зерновий, відповідно запиленість повітря перевищує безпечні норми для людей у 6 разів. Незначне зменшення запиленості повітря при виготовленні комбікорму власної рецептури може бути пов'язано як зі зменшенням вмісту пилеутворюючих компонентів рослинного походження, так й зі збільшенням вмісту жиру у ВРК за рахунок введення вафлі з жирової начинкою з середнім вмістом жиру 27 г на 100 г продукції. У складських приміщеннях для зберігання гранульованих комбікормів запиленість повітря в середньому в 1,5 разів менше, ніж у приміщеннях для зберігання сухих комбікормів. У всіх випадках переважає пил з розміром частинок PM₁₀.

Таблиця 1 – Запиленість повітря виробничих приміщень для різних типів комбікормів

Тип приміщення	Температура повітря, °С	Атмосферний тиск, мм.рт.ст	Концентрація пилу, С, мг/м ³		
			ваговий метод	експрес метод	
				PM _{2,5}	PM ₁₀
Виробниче приміщення для приготування сухого комбікорму – СК – ВРК	18	752			
			24,56	5,00	19,00
			20,46	4,00	16,00
Склад зберігання сухих комбікормів (у мішках) – СК – ВРК	18	752			
			8,48	2,00	6,00
			7,23	1,00	6,00
Склад зберігання гранульованих комбікормів (у мішках)	16	748	5,65	1,00	4,00

В залежності від типу фермерського господарств запиленість повітря у приміщенні для утримання свиней відрізняється в 2,4 рази до початку годівлі (рис. 2а). Це пов'язано з

відсутністю примусової вентиляції у мікро господарствах, де населення утримує свиней без дотримання зоогігієнічних норм. Запиленість повітря у досліджуваному середньому господарстві в момент висипання гранульованого корму та подачі сухого (СК) майже не відрізняється. Найпоширенішим способом годівлі свиней сухим кормом у середніх та великих господарствах є бункерна система подачі корму, яка фактично унеможливорює потрапляння пилу від комбікормів до повітря приміщення. На $2,02 \text{ мг/м}^3$ збільшується запиленість повітря у приміщеннях для утримання свиней без вентиляції при подачі сухого комбікорму (СК) порівняно з гранульованим. У добре вентильованих приміщеннях середніх господарств через 20 хв після висипання сухого комбікорму концентрація пилу швидко зменшується, тоді як у приміщеннях мікро господарств зменшення концентрації пилу за 20 хв становить всього на $0,44 \text{ мг/м}^3$ (рис.2а).

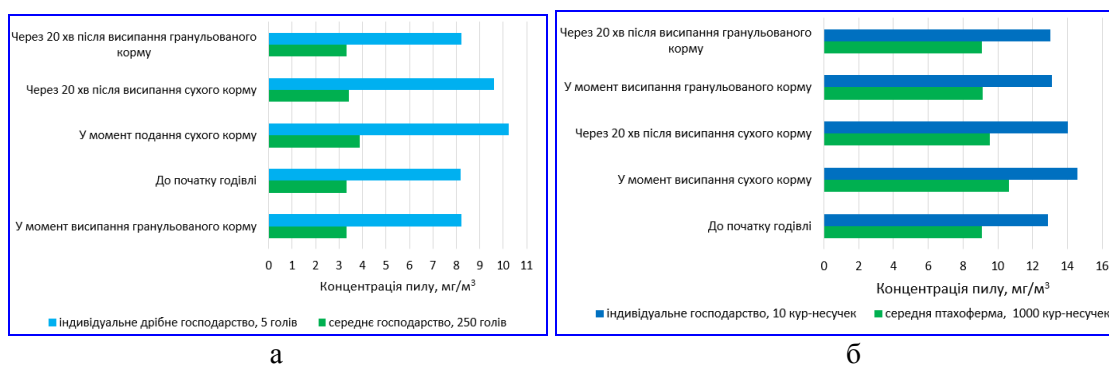


Рисунок 2 – Концентрація пилу у повітрі приміщень для годівлі свійських тварин в залежності від типу комбікорму (ваговий метод)

а – приміщення для утримання свиней; б – приміщення для утримання кур-несучек

Початкова запиленість повітря вища у приміщеннях для утримання птиці (кур-несучек) вища на $1\text{--}1,5 \text{ мг/м}^3$, ніж у приміщеннях для утримання свиней (рис. 2а,б). Це пов'язано з наявністю пір'я та пуху у кур-несучек, а також відмінностями у хімічному та агрегатному стані посліду й матеріалу підлоги, що є додатковим пилеутворюючим фактором. Проведені дослідження показали, що у приміщеннях для утримання птиці так само спостерігається підвищення запиленості повітря при використанні сухого комбікорму. Проте, враховуючи особливості конструкції системи для годівлі, на відмінну від свинарників, у пташниках середніх господарств спостерігається збільшення запиленості повітря у 1,2 рази в момент висипання сухого корму, та відсутність суттєво збільшення концентрації пилу при використанні гранульованого комбікорму (рис. 2б). За відсутності примусової вентиляції в індивідуальних домогосподарствах у приміщеннях для утримання кур-несучек через 20 хвилин після висипання сухого корму спостерігається не значне зменшення концентрації пилу, на відмінну від середніх фермерських господарств (рис. 2б).

Концентрацію пилу $\text{PM}_{2,5}$ у приміщеннях свиноферм та птахофабрика різного типу не перевищує рекомендовані ВООЗ норми та становить $\leq 3 \text{ мг/м}^3$, тобто у таких приміщеннях переважає пил PM_{10} .

Концентрація пилу на відстані 50 метрів від цеху з виробництва сухого комбікорму, згідно отриманих під час досліджень даних, становить $0,52 \text{ мг/м}^3$. Проте заміри у кількох інших точках даного населеного пункту показали концентрацію пилу в межах $0,5\text{--}0,52 \text{ мг/м}^3$. Таким чином зробити висновок про негативний вплив на стан повітря від цеху з виробництва сухого комбікорму можна тільки після проведення додаткових лабораторних досліджень хімічного складу пилу.

Висновки. Підвищена концентрація пилу у повітря призводить до подразнення верхніх дихальних шляхів як тварин, так й робітників. Надалі тварини стають більш вразливими для проникнення бактерії та вірусів через подразнені ділянки. Пил рослинного походження є патогенним середовищем, оскільки може переносити мікроорганізми та ендотоксини, таким чином створюючи додаткове навантаження на організм тварин, особливо новонароджених та віком до 1 місяця.

Сухі комбікорми є дешевими та розповсюдженими у різних типах господарств для годівлі свійських тварин. На відміну від гранульованого, сухий комбікорм має ряд недоліків, серед яких створення додаткового пилового навантаження також є суттєвим.

Проведені дослідження показали, що при зберіганні сухого комбікорму концентрація пилу у приміщеннях в 1,5 разів більша, ніж при зберіганні гранульованого.

За наявності примусової вентиляції у приміщеннях для утримання свійських тварин, тобто в середніх господарствах, через 20 хвилин після висипання сухого комбікорму створена ним додаткова концентрація пилу майже повністю нейтралізується. В індивідуальних домогосподарствах, де свійські тварини утримуються у приміщеннях без примусової циркуляції повітря, використання сухих комбікормів стандартної рецептури приводить до підвищення концентрації пилу в середньому у 1,2 рази.

Для сталого поводження з твердими органічними відходами кондитерських виробництв розглядається можливість їх застосування в складі комбікормів. Результати проведених досліджень показали, що за рахунок підвищення вмісту жиру при введенні до складу сухого комбікорму одного з видів твердих органічних відходів кондитерських виробництв, а саме вафель з жировою начинкою, вдається зменшити в 1,3 рази концентрацію пилу у приміщенні для виготовлення комбікорму. Також спостерігається зменшення концентрації пилу при зберіганні сухого комбікорму, який містить відходи вафель з жировою начинкою.

Перспективним напрямком подальших досліджень є визначення оптимальної рецептури комбікорму з додаванням різних типів твердих органічних відходів кондитерських виробництв (вафель, печива) з метою отримання збалансованого корму, виготовлення та використання якого створює мінімальне додаткове пилове навантаження на повітря.

Література

1. Рябініна О. В., Іщенко Ю. Б., Кульбаба С. В. Оптимальні параметри мікроклімату в пташнику та їх контроль. *Птахівництво*. 2019. № 10. С. 20–22.
2. Barahona M, Hachemi M. A. & Campo M.D.M. et al. Feeding, Muscle and Packaging Effects on Meat Quality and Consumer Acceptability of Avileña-Negra Ibérica Beef. *Foods*. 2020. No. 9 (7). P. 853. doi: <https://doi.org/10.3390/foods9070853>.
3. Mohd Azmi A. F., Mat Amin F., Ahmad H. et al. Effects of Bypass Fat on Buffalo Carcass Characteristics, Meat Nutrient Contents and Profitability. *Animals* (Basel). 2021 No. 11 (11). P. 3042. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11113042>.
4. Хвостик В. П. Моделювання динаміки росту м'ясо-яєчних курей. *Передгірне та гірське землеробство і тваринництво*. 2022. Вип. 72 (1). С. 161–175.

5. Зотько М. О. Вплив різних факторів на молочну продуктивність корів. *Аграрна наука та харчові технології*. 2018. Вип. 1 (100). С. 122–124.

6. Адашевський О. В. Використання твердих відходів кондитерських фабрик при виробництві комбикормів як елемент сталого розвитку України. *Екологічні науки : науково-практичний журнал*. 2023. № 1 (46). С. 179–183.

7. Мірошніченко Д. В., Байрачний В. Б., Адашевський О. В. Комплексний підхід до запобігання пліснявіння твердих органічних відходів кондитерських виробництв як елемент сталого поводження з ними. *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2024. № 4. С. 111–121.

8. Неменуца С. М., Фесенко О. О., Лисюк В. М. Підприємства по зберіганню зерна: ризик виникнення пожеж. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2019. № 1 (7). С. 3–12.

9. Пелешко М. З., Бабаджанова О. Ф., Башинський О. І. Пожежна безпека об'єктів агропромислового комплексу : навч. посібник. Львів : ЛДУБЖД, 2017. 176 с.

10. Kimanzi V., Charles M. Mburu, Paul M. Njogu. PM2.5 and PM10 exposure in selected animal feed processing facilities in Kiambu County, Kenya. *Journal of Agriculture Science & Technology*. 2022. No. 21 (4). P. 56–64.

11. Методичні вказівки до лабораторної роботи «Визначення запиленості атмосферного повітря» з дисципліни «Екологія» : для студентів усіх спеціальностей денної та заочної форм навчання / уклад.: Л. А. Васьковець, Н. С. Євтушенко, Н. Є. Твердохлебова. 2020. Харків : НТУ «ХПІ». 50 с.

12. Яремчук О. С., Ордіховська О. А., Поліщук Т. В. Лабораторний практикум з гігієни тварин до виконання лабораторних робіт для студентів денної форми навчання напряму підготовки 6. 090102 «Технологія виробництва і переробки продукції тваринництва». 2015. Вінниця : Типографія ВНАУ. 192 с.

13. Наказ МОЗ України № 1192 від 09.07.2024 р. 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: 20.02.2025).

Bibliography (transliterated)

1. Riabinina O. V., Ishchenko Yu. B., Kulbaba S. V. (2019). Optymalni parametry mikroklimatu v ptashnyku ta yikh kontrol. *Ptakhivnytstvo*. Ukraina, 10, 20–22.

2. Barahona M, Hachemi M. A. & Campo M.D.M. (2020). Feeding, Muscle and Packaging Effects on Meat Quality and Consumer Acceptability of Avileña-Negra Ibérica Beef. *Foods*, 9(7), 853. doi: <https://doi.org/10.3390/foods9070853>.

3. Mohd Azmi A. F., Mat Amin F., Ahmad H., Mohd Nor N., Meng G. Y., Zamri Saad M., Abu Hassim H. (2021). Effects of Bypass Fat on Buffalo Carcass Characteristics, Meat Nutrient Contents and Profitability. *Animals* (Basel), 11(11), 3042. doi: <https://doi.org/10.3390/ani11113042>

4. Khvostyk V. P. (2022). Modeliuvannia dynamiky rostu miaso-yaiechnykh kurei. *Peredhirne ta hirske zemlerobstvo i tvarynnytstvo*, 72(1), 161–175.

5. Zotko M. O. Vplyv riznykh faktoriv na molochnu produktyvnist koriv (2018). *Ah-rarna nauka ta kharchovi tekhnolohii*, 1(100), 122–124.
6. Adashevskiy O. V. (2023). Vykorystannia tverdykh vidkhodiv kondyterskykh fabryk pry vyrobnytstvi kombikormiv yak element staloho rozvytku Ukrainy. *Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal*, 1(46), 179–183.
7. Miroshnychenko D. V., Bairachnyi V. B., Adashevskiy O. V. (2024). Kompleksnyi pidkhyd do zapobihannia plisniavinnia tverdykh orhanichnykh vidkhodiv kondyterskykh vyrobnytstv yak element staloho povodzhennia z nymy. *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*, 4, 111–121.
8. Nemenushcha S. M., Fesenko O. O., Lysiuk V. M. (2019). Pidpriemstva po zberihanniu zerna: ryzyk vynyknennia pozhezh. *Naukovyi visnyk: Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka*, 1(7), 3–12.
9. Peleshko M. Z., Babadzhanova O. F., Bashynskiy O. I. (2017). Pozhezhna bezpeka obiektiv ahropromyslovoho kompleksu: navchalnyi posibnyk. Lviv: LDUBZhD, 176 p.
10. Kimanzi V., Charles M. Mburu, Paul M. Njogu. (2022) PM2.5 and PM10 exposure in selected animal feed processing facilities in Kiambu County, Kenya. *Journal of Agriculture Science & Technology*, 21(4), 56–64.
11. Vaskovets L. A., Yevtushenko N. S., Tverdokhliebova N. Ye (2020). Metodychni vkazivky do laboratornoi roboty «Vyznachennia zapylenosti atmosferного povitria» z dystsypliny «Ekolohiia» dlia studentiv usikh spetsialnostei dennoi ta zaочноi form navchannia, Kharkiv: NTU «KhPI», 50 p.
12. Yaremchuk O. S., Ordikhovska O. A., Polishchuk T. V. (2015). Laboratornyi praktykum z hihiieny tvaryn do vykonannia laboratornykh robit dlia studentiv dennoi formy navchannia napriamu pidhotovky 6. 090102 «Tekhnolohiia vyrobnytstva i pererobky produktsii tvarynnytstva», Vinnytsia: Typohrafiia VNAU, 192 p.
13. Nakaz MOZ Ukrainy № 1192 vid 09.07.2024r. Pro zatverdzhennia derzhavnykh medyko-sanitarnykh normatyviv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rehovyn u povitri robochoi zony URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24#Text>.

УДК 504.06

В. Б. Байрачний, О. В. Адашевський, А. О. Сакун, А. О. Литвин, В. С. Бутко

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАПИЛЕНOSTІ ПОВІТРЯ ТВАРИННИЦЬКИХ КОМПЛЕКСІВ

Стале тваринництво є необхідним елементом загального сталого розвитку країни. Забезпечення населення якісними та безпечними продуктами тваринницького комплексу є запорукою продовольчої безпеки, для отримання яких одним з головних елементів є годівля тварин високоякісними кормами. Тваринництво є галуззю економіки, яка має значний негативний вплив на навколишнє природне середовище. Мінімізація такого негативного впливу на кожному етапі виробництва продукції тваринництва – від вирощування до обробки – сприяє переходу до сталого тваринництва.

Стале поводження з різними типами відходів, в тому числі з відходами кондитерських виробництв, полягає у їх вторинному використанні в якості ресурсоцінних

матеріалів. Тверді органічні відходи кондитерських виробництв, такі як готові вафлі, печиво, цукерки, можуть стати складовою комбікормів для свійських тварин.

Підвищена концентрація пилу у повітря призводить до подразнення верхніх дихальних шляхів як тварин, так й робітників. Надалі тварини стають більш вразливими для проникнення бактерії та вірусів через подразнені ділянки. Сухі комбікорми є найдешевшим типом комбікормів, проте їх виробництво та використання потенційно є джерелом утворення додаткового пилового навантаження.

Метою роботи було дослідження запиленості повітря різних типів тваринницьких комплексів в залежності від типу комбікорму, який переважно використовується для годівлі.

У роботі використані наступні методи дослідження: ваговий метод для визначення концентрації пилу у повітрі приміщень для утримання тварин; експрес метод для визначення концентрації пилу у приміщеннях та ззовні з використанням приладу Walcom HT-9600, який використовує лазерний принцип. Даний прилад дозволяє визначити окремо концентрацію частинок пилу $PM_{2,5}$ та PM_{10} , що неможливо ваговим методом. Дослідження проводились в індивідуальних господарствах з утримання свиней та кур-несучек, а також у фермерських господарствах середнього розміру у Харківській області. В якості сухих комбікормів використовували як стандартний гранульований та сухий комбікорм, так й сухий комбікорм виготовлений за розробленою рецептурою з додаванням твердих органічних відходів кондитерських виробництв.

Проведені дослідження показали, що при зберіганні сухого комбікорму концентрація пилу у приміщеннях в 1,5 разів більша, ніж при зберіганні гранульованого.

Результати проведених досліджень показали, що за рахунок підвищення вмісту жиру при введенні до складу сухого комбікорму одного з видів твердих органічних відходів кондитерських виробництв, а саме вафель з жировою начинкою, вдається зменшити в 1,3 рази концентрацію пилу у приміщенні для виготовлення сухого комбікорму. Також спостерігається зменшення концентрації пилу при зберіганні сухого комбікорму, який містить відходи вафель з жировою начинкою.

Ключові слова: тваринницькі комплекси, комбікорм, тверді органічні відходи кондитерських виробництв, запиленість повітря, гігієнічні норми, параметри мікроклімату, стале поводження.

V. B. Bairachnyi, O. V. Adashevskyi, A. O. Sakun, A. O. Lytvyn, V. S. Butko

AIR DUST POLLUTION RESEARCH AT LIVESTOCK COMPLEXES

Sustainable livestock farming is a necessary element of the country's sustainable development. Providing the population with high-quality and safe livestock products is a food security guarantee, for which one of the main elements is feeding animals with high-quality feed. Livestock farming is an economic sector that has a significant negative impact on the environment. Minimizing such negative impact at each stage of livestock production – from breeding to processing – contributes to the transition to sustainable livestock farming.

Sustainable management for various types of waste, including confectionery waste, consists in their secondary use as resource-valuable materials. Solid organic waste from con-

fectionery production, such as ready-made wafers, cookies, and candies, can become a component of compound feed for domestic animals.

Dust concentration at high levels in the air leads to irritation of the upper respiratory tract - both animals and workers. In the future, animals become more vulnerable to the penetration of bacteria and viruses through irritated areas. Dry feed is the cheapest feed type, but its production and use are potentially an additional dust load source.

The aim of the work was to study the air dustiness at different types of livestock complexes depending on the feed type mainly used for feeding.

The following research methods were used in the work: a weight method for determining the dust concentration in the air of premises for keeping animals; an express method for determining the dust concentration in buildings and outside using the Walcom HT-9600 device, which uses the laser principle. This device allows us to separately determine the PM_{2.5} and PM₁₀ dust particle concentrations, which is impossible with the weight method. The research was conducted in individual farms for keeping pigs and laying hens, as well as in medium-sized farms in the Kharkiv region. As dry feed, both standard granulated and dry feed were used, as well as dry feed made according to a developed recipe with the addition of solid organic waste from confectionery industries.

The conducted studies have shown that when storing dry feed, the dust concentration in the premises is 1.5 times higher than when storing granulated feed.

It was found that by increasing the fat content when introducing one solid organic waste type from confectionery production into the dry feed composition, namely wafers with fat filling, it is possible to reduce the dust concentration while the dry feed production by 1.3 times. There is also a decrease in the dust concentration when storing dry feed, which contains waste from wafers with fat filling.

Keywords: livestock complexes, compound feed, solid organic waste from confectionery production, air dustiness, hygiene standards, microclimate parameters, sustainable management.

B. V. Putiatin¹, O. M. Blyzniuk¹, D.Sc., Prof., A. P. Belinska¹, Ph.D., Assoc. Prof.,
S. V. Stankevych², Ph.D., Assoc. Prof., A. O. Kariuk³, Sen. Lecture,
N. Yu. Kibenko², Sen. Lecture

TECHNOLOGICAL AND BIOMATERIAL SCIENCE APPROACHES TO QUALITY ASSESSMENT OF ESSENTIAL OILS IN THE COSMECEUTICAL INDUSTRY

¹National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv

²State Biotechnology University, Kharkiv

³O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv

Keywords: quality control, lavender essential oil, tea tree essential oil, fatty acid composition, acylglycerol composition, chromatographic profile.

Introduction

One of the most critical concerns for consumers in the perfume and cosmetic market is the efficacy of products. Protecting consumers from misleading claims regarding the effectiveness and other characteristics of cosmetic products is a cornerstone of global regulatory frameworks. Cosmetic products must deliver tangible benefits to users [1]. In Europe, Regulation (CE) No. 655/2013 [1] explicitly states: "*Claims concerning cosmetic products, whether explicit or implicit, shall be supported by adequate and verifiable evidence, regardless of the types of evidence used to substantiate them, including compliance.*" The evidence base for cosmetic product efficacy must consider real-world usage conditions, with studies being relevant to the raw materials, the product itself, and its claimed benefits. Additionally, research must adhere to well-designed and properly organized methodologies (valid, reliable, and reproducible) while complying with universally accepted ethical standards [2, 3]. The efficacy of a cosmetic product is directly dependent on the quality of its raw materials. This article proposes a comprehensive approach to assessing the quality and composition of essential oils, using tea tree oil and lavender oil as case studies. Use of Synthetic and Artificial Essential Oils (EOs) in cosmetology and cosmeceuticals is legally permitted and highly practical in formulation development, as it ensures compositional stability and consistent fragrance – attributes difficult to achieve with natural essential oils alone. However, synthetic and artificial oils often fail to deliver the desired clinical efficacy due to the absence of unique bioactive compounds found in natural EOs [4].

Adulteration of Natural Essential Oils refers to the deliberate alteration of a natural EO's composition for economic gain, achieved by introducing additives or selectively removing valuable components while maintaining the appearance of product quality. Adulterated EOs may also originate from falsified plant raw materials. Common adulterants include synthetic additives, volatile (so-called "turpentine") fractions of certain EOs, cheaper EOs, purified kerosene, vegetable fats, and even mineral oils. Typically, unethical producers engage in such practices to market substandard products, particularly with high-value EOs.

Quality Control of Essential Oils ensures that cosmetic products containing EOs as active ingredients meet declared specifications and deliver the promised benefits of the final product.

Study of Existing Solutions to the Problem

The use of essential oils in cosmetic products is widespread worldwide. Due to the unique content of biologically active substances in essential oils, cosmetic products possess a range of functional properties. For instance, cosmetic products intended for skin care and containing essential oils stimulate local blood circulation, exhibit firming and rejuvenating effects, relieve irritation, eliminate flaking, possess antiseptic and anti-inflammatory properties, create a natural protective barrier, demonstrate healing functions, and have the ability to penetrate deep into the subcutaneous layer of the epidermis, providing hydration and softening while reducing pigmentation [5–7]. The efficacy of a cosmetic product directly depends on the quality of the essential oil used. To prevent the use of low-quality or adulterated essential oils in cosmetic production, a series of methods for determining quality and assessing the composition of essential oils have been developed and implemented. This article proposes an examination of lavender essential oil and tea tree essential oil (supplied by Düllberg Konzentra GmbH & Co, Germany).

Lavender Essential Oil is obtained from the flowering spikes of narrow-leaved lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.), which grows in many European countries, Canada, the USA, and Moldova. Lavender oil is a mobile, colorless or yellowish-green liquid with a bitter taste and the fresh floral scent of lavender with a woody undertone. Its chemical composition includes linalool (30–35 %), myrcene, α - and β -ocimene, γ -terpinene, α -pinene, caryophyllene, bergamotene, γ - and δ -cadinene, α -curcumene, farnesene, α -terpineol, geraniol, and camphor. The oil is extracted from the flower spikes through steam distillation, with a yield ranging from 0.78 % to 1.1% [2, 8, 9]. Lavender essential oil exhibits antiseptic, anti-burn, regenerative, and anti-inflammatory properties. It helps reduce skin redness and flaking, promotes the healing of wounds, cuts, and abrasions, prevents dandruff formation, is effective against pediculosis, and soothes skin after insect bites.

Tea Tree Oil is an essential oil obtained through hydrodistillation (steam distillation) from the leaves of the tea tree (*Melaleuca* spp.). It is a colorless or pale yellow liquid with a distinct camphoraceous odor. It is soluble in ethanol, vegetable oils, and propylene glycol; poorly soluble in glycerin; and insoluble in water. Tea tree oil contains over 100 terpene derivatives [3, 10]. The most effective antibacterial components of this oil are terpinen-4-ol, α -pinene, linalool, and α -terpineol. Lipophilic terpineols penetrate the cell membranes of microorganisms, exerting a toxic effect on their membrane structure and function [6, 7].

Purpose and Main Objectives of the Study

The aim of this study is to assess the composition and quality of lavender essential oil (supplier – Düllberg Konzentra GmbH & Co, Germany) and tea tree essential oil (supplier – Düllberg Konzentra GmbH & Co, Germany) available on the cosmetic market, based on the parameters established in normative documentation [2, 3].

Materials and Methods

To verify the composition and quality of the essential oils, an integrated approach was employed using modern analytical equipment. This included gas-liquid chromatography with high-temperature columns and a set of methods such as the determination of fatty acid composition, acylglycerol composition, and obtaining the chromatographic profile of the essential oil [4, 5]. The quality control and composition analysis of tea tree essential oil were carried out according to the physicochemical parameters defined in applicable standards.

The fatty acid composition was determined according to DSTU ISO 5508-2001 "Animal and vegetable fats and oils. Analysis by gas chromatography of methyl esters of fatty

acids" [8, 11]. The acylglycerol composition was assessed in accordance with ISO/TS 17383:2014 "Determination of triacylglycerol composition in fats and oils – capillary gas chromatography method" [5, 12].

The study was conducted in the Scientific and Methodological Laboratory of Chromatographic Studies at SE "Ukrmetrteststandart" (Kyiv, Ukraine). The determination of acylglycerol composition was performed using a CP-3800 gas chromatograph (Varian), equipped with a flame ionization detector, electronic gas flow control system, a universal injector operating in both split and splitless modes, an autosampler (CP-8410 Varian), and Galaxy software. A MET-Biodiesel capillary column (length 14 m, internal diameter 0.53 mm, film thickness 0.16 μm) with an integrated 2-meter precolumn (internal diameter 0.53 mm) was used. Chromatographic separation was carried out under the following conditions: carrier gas flow rate – 2.5 mL/min, split ratio – 20:1, injector temperature – 390 °C, detector temperature – 400 °C, and a column oven temperature program with a gradual increase from 90 °C to 380 °C.

The fatty acid composition was analyzed using gas-liquid chromatography on an Agilent Technologies 7890 gas chromatograph with a Zebron FAME (Phenomenex) capillary column, 100 m in length, with an internal diameter of 0.25 mm and stationary phase thickness of 0.2 μm , under the following conditions: carrier gas flow rate – 1.2 mL/min, split ratio – 1:100, evaporator temperature – 280 °C, detector (FID) temperature – 290 °C, and column oven temperature program with a gradual increase from 60 °C to 230 °C. The injection volume was 1 μL .

For the identification of chromatographic peaks and chromatogram processing, a 37 Component FAME Mix of methyl esters of fatty acids from Supelco (Cat. No. 47885-U) was used. The chromatograms were recorded and processed using a personal computer equipped with ChemStation OpenLab software.

The chromatographic profile was obtained using an Agilent Technologies 7890 gas chromatograph with a vf-5ms capillary column, 25 m in length, internal diameter 0.25 mm, and stationary phase thickness of 0.33 μm , under the following conditions: carrier gas flow rate – 1.0 mL/min, split ratio – 1:20, evaporator temperature – 250 °C, detector (FID) temperature – 280 °C, and column oven temperature program with a gradual increase from 60 °C to 185 °C.

Research Results

The first stage of the study involved obtaining the chromatographic profile with the identification of aromatic components (data are presented in Table 1). It was established that, according to the chromatographic profile, the tested sample of lavender essential oil meets the requirements for lavender oil in accordance with ISO 3515:2017 "Oil of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.)". The normative requirements are presented in accordance with ISO 3515:2017 "Oil of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.)".

During the investigation of the chromatographic profile of tea tree essential oil, terpinen-4-ol was identified at a concentration of 16.6 %, although this compound is the principal active terpene component and should be present within the range of 35.0–48.0 % as specified by ISO 11024-1. The obtained results prompted further analysis, and the next stage of the research was the determination of the acylglycerol composition. The data revealed a relative mass fraction of triglycerides of 84.5 %, indicating the presence of vegetable oil in the essential oil sample. Subsequent studies focused on the identification of the oil based on its fatty acid composition. It was determined that the investigated essential oil contains soybean oil. Based on the results of gas-liquid chromatography, a summary table of the

complex physicochemical parameters of tea tree oil was compiled (Table 2). The normative requirements are provided in accordance with DSTU 4534:2006 "Soybean oil. Technical specifications" and ISO 4730:2017 "Essential oil of *Melaleuca*, terpinen-4-ol type (Tea tree oil)".

Table 1 – Lavender essential oil (chromatographic profile)

Name of components	Regulatory documentation requirements	Research results	Uncertainty, U (k = 2, P = 0,95)	Regulatory documentation for test methods
Limonene, %	no more than 1	0,84	± 0,08	ISO 11024-1
1,8-Cineole, %	no more than 3	0,38	± 0,04	ISO 11024-1
beta-Phellandrene, %	no more than 1	not detected (<0,1)		ISO 11024-1
cis-beta-ocimene, %	no more than 10	0,62	± 0,06	ISO 11024-1
trans-beta-ocimene, %	no more than 6	0,27	±0,03	ISO 11024-1
3-Octanone, %	no more than 3	0,19	± 0,02	ISO 11024-1
Camphor, %	no more than 1.5	0,23	± 0,02	ISO 11024-1
Linalool, %	20-43	38,8	± 1,9	ISO 11024-1
Linalyl acetate, %	25-47	39,4	±2,0	ISO 11024-1
Lavandulol, %	no more than 3	1,9	±0,2	ISO 11024-1
Terpinen-4-ol, %	no more than 8	1,3	±0,1	ISO 11024-1
Lavandulyl acetate, %	no more than 8	7,2	±0,7	ISO 11024-1
Alpha-Terpineol, %	no more than 2	0,83	± 0,08	ISO 11024-1

The data obtained confirm the feasibility of using an integrated approach to assess the quality and composition of essential oils and indicate the need for more stringent control of essential oil quality at all stages of delivering this product to the end consumer.

Висновки

The study established that the content of the main aromatic compounds – linalool (38.8 %) and linalyl acetate (39.4 %) – according to the chromatographic profiles, complies with the requirements for lavender essential oil as set out in ISO 3515:2017 "Oil of lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.)". The sample of tea tree essential oil, based on its chromatographic profile, did not meet the requirements of ISO 4730:2017 "Essential oil of *Melaleuca*, terpinen-4-ol type (Tea tree oil)". The sample contained 84.5 % vegetable oil. According to its fatty acid composition, the vegetable oil present in the sample corresponded to the requirements for soybean oil defined in DSTU 4534:2006 "Soybean oil. Technical specifications". The obtained results confirm the necessity of a comprehensive approach in selecting analytical methods and designing research strategies for the quality assessment and composition analysis of essential oils, particularly for purposes of identification and detection of adulteration or falsification.

Table 2 – Tea tree essential oil. Physicochemical research indicators

Name of components	Regulatory documentation requirements	Research results	Uncertainty, U (k = 2, P = 0,95)	Regulatory documentation for test methods
<u>Fatty acid composition (relative mass fraction of fatty acids, %)</u>				
Palmitic (C _{16:0})	7,0–13	11,1	±0,4	DSTU ISO 5508
Stearic (C _{18:0})	2,0–6,0	4,3	±0,6	DSTU ISO 5508
Oleic (C _{18:1})	18,0–30,0	24,4	±1,0	DSTU ISO 5508
Linoleic (C _{18:2})	44,0–62,0	52,7	± 1,1	DSTU ISO 5508
Linolenic (C _{18:3})	4,0–11,0	5,9	±0,8	DSTU ISO 5508
<u>Acylglyceride composition</u>				
Relative mass fraction of triglycerides, %		84,5	± 4,2	ISO/TS 17383:2014
<u>Chromatographic profile of the aromatic component</u>				
Alpha-pinene, %	1,0–6,0	4,6	±0,5	ISO 11024-1
Sabinene, %	no more than 3,5	не виявлено (<0,1)		ISO 11024-1
Alpha-terpinene, %	6,0–12,0	14,2	± 1,4	ISO 11024-1
Limonene, %	0,5–1,5	4,2	±0,4	ISO 11024-1
Rho-cymene, %	0,5–8,0	7,0	±0,7	ISO 11024-1
1,8-cineole, %	no more than 10,0	10,0	±1,0	ISO 11024-1
Gamma-terpinene, %	14,0–28,0	10,6	± 1,1	ISO 11024-1
Terpinol, %	1,5–5,0	2,9	±0,4	ISO 11024-1
Terpinen-4-ol, %	35,0–48,0	16,6	± 1,7	ISO 11024-1
Alpha-terpineol, %	2,0–5,0	23,5	± 2,4	ISO 11024-1
Aromadendrene, %	0,2–3,0	not detected (<0,1)	–	ISO 11024-1
Delta-cadinene, %	0,2–3,0	not detected (<0,1)	–	ISO 11024-1
Globulol, %	no more than 1,0	not detected (<0,1)	–	ISO 11024-1
Viridoflorol, %	no more than 1,0	not detected (<0,1)	–	ISO 11024-1

Literature

1. Regulation (EC) No 1223/2009 of the European Parliament and of the Council of 30 November 2009 on cosmetic products (Брюсель, 30 листопада 2009 року).
2. Specification: ISO 3515:2002 (EN ISO 3515:2002). Geneva : International Organization for Standardization, 2002. 12 p.
3. Specification: ISO 4730:2017 (EN ISO 4730:2017). Geneva : International Organization for Standardization, 2017. 14 p.

4. Tranchida P. Q., Shellie R. A., Purcaro G. et al. Analysis of fresh and aged Tea tree essential oils by using GC×GC–qMS. *Journal of Chromatographic Science*. 2010. Vol. 48. P. 262–266.
5. Gallart-Mateu D., Rodrigues-Sojoa S., M.de la Guardia. Determination of tea tree oil terpenes by headspace gas chromatography mass spectrometry. *Analytical Methods*. 2016. Vol. 8. P. 4576–4583.
6. Lis-Balchin M., Hart S. L., Deans S. G. Pharmacological and antimicrobial studies on different tea-tree oils (*Melaleuca alternifolia*, *Leptospermum scoparium* or Manuka and *Kunzea ericoides* or Kanuka), originating in Australia and New Zealand. *Phytother Res*. 2000. Vol. 14 (8). P. 623–629.
7. Carson C. F., Hammer K. A., Riley T. V. *Melaleuca alternifolia* (Tea Tree) Oil : a Review of Antimicrobial and Other Medicinal Properties. *Clin. Microbiol. Rev*. 2006. Vol. 19 (1). P. 50–62.
8. Yuying Lin, Genfa Yu, Songxing Zhang et al. Comparative analysis of the differences in volatile organic components of three lavender essential oils in Ili region using sensory evaluation, GC-IMS and GC-MS techniques. *Journal of Chromatography A*. 2024. Vol. 1731. P. 465197. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2024.465197>.
9. Kozuharova E., Simeonov V., Batovska D. et al. Stoycheva C., Valchev H., Benbassat N. Chemical composition and comparative analysis of lavender essential oil samples from Bulgaria in relation to the pharmacological effects. *Pharmacia*. 2023. Vol. 70 (2). P. 395–403. DOI: <https://doi.org/10.3897/pharmacia.70.e104404>.
10. Жири та олії тваринні й рослинні. Аналізування методом газової хроматографії метилових ефірів жирних кислот (ISO 5508:1990, IDT): ДСТУ ISO 5508-2001. [Чинний від 2003-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2003. 15 с. (Національні стандарти України).
11. Олії ефірні. Загальні настанови щодо хроматографічних профілів: ДСТУ ISO 11024-1:2005. [Чинний від 2006-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2005. 15 с. (Національні стандарти України).
12. Rashed M.M.A., Han F., Ghaleb A.D.S. et al. Bao N., Dong Z., Zhai K.-F., Al Hashedi S. A., Lin L., Jafari S. M. Traceability, authentication, and quality control of food-grade lavender essential oil: A comprehensive review. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2025. Vol. 340. 103466. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103466>

Bibliography (transliterated)

1. Regulation (EC) No 1223/2009 of the European Parliament and of the Council of 30 November 2009 on cosmetic products (Brusel, 30 lystopada 2009 roku).
2. Specification: ISO 3515:2002 (EN ISO 3515:2002). Geneva: International Organization for Standardization, 2002. 12 p.
3. Specification: ISO 4730:2017 (EN ISO 4730:2017). Geneva: International Organization for Standardization, 2017. 14 p.
4. Tranchida P. Q., Shellie R. A., Purcaro G. et al. (2010). Analysis of fresh and aged Tea tree essential oils by using GC×GC–qMS. *Journal of Chromatographic Science*, 48, 262–266.
5. Gallart-Mateu D., Rodrigues-Sojoa S., M.de la Guardia (2016). Determination of tea tree oil terpenes by headspace gas chromatography mass spec-trometry. *Anal. Methods*, 8, 4576–4583.

6. Lis-Balchin M., Hart S. L., Deans S. G. (2000). Pharmacological and antimicrobial studies on different tea-tree oils (*Melaleuca alternifolia*, *Leptospermum scoparium* or *Manuka* and *Kunzea ericoides* or *Kanuka*), originating in Australia and New Zealand. *Phytother Res*, 14 (8), 623–629.

7. Carson C. F., Hammer K. A., Riley T. V. (2006). *Melaleuca alternifolia* (Tea Tree) Oil: a Review of Antimicrobial and Other Medicinal Properties. *Clin. Microbiol. Rev.*, 19 (1), 50–62.

8. Lin Y., Yu G., Zhang S., Zhu G., Yi F. (2024). Comparative analysis of the differences in volatile organic components of three lavender essential oils in Ili region using sensory evaluation, GC-IMS and GC-MS techniques. *J. Chromatogr. A*, 1731, 465197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2024.465197>.

9. Kozuharova E., Simeonov V., Batovska D., Stoycheva C., Valchev H., Benbassat N. (2023). Chemical composition and comparative analysis of lavender essential oil samples from Bulgaria in relation to the pharmacological effects. *Pharmacia*, 70 (2), 395–403. doi: <https://doi.org/10.3897/pharmacia.70.e104404>.

10. Zhyry ta olii tvarynni y roslynni. Analizuvannia metodom hazovoi khromato-hrafiy metylovykh efiriv zhyrnykh kyslot (ISO 5508:1990, IDT): DSTU ISO 5508-2001. [Chynnyi vid 2003-01-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2003. 15 p. (Natsionalni standarty Ukrainy).

11. Olii efirni. Zahalni nastanovy shchodo khromatohrafichnykh profiliv: DSTU ISO 11024-1:2005. [Chynnyi vid 2006-01-01]. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2005. 15 p. (Natsionalni standarty Ukrainy).

12. Rashed, M.M.A., Han, F., Ghaleb, A.D.S., Bao, N., Dong, Z., Zhai, K.-F., Al Hashedi, S.A., Lin, L., & Jafari, S.M. (2025). Traceability, authentication, and quality control of food-grade lavender essential oil: A comprehensive review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 340, 103466. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cis.2025.103466>.

УДК 66.7:633.88:620.3:615.4:668.5:543

Б. В. Путятін, О. М. Близнюк, А. П. Белінська, С. В. Станкевич, А. О. Карюк,
Н. Ю. Кібенко

ТЕХНОЛОГІЧНІ ТА БІОМАТЕРІАЛОЗНАВЧІ ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ЯКОСТІ ЕФІРНИХ ОЛІЙ У КОСМЕЦЕВТИЧНІЙ ПРОМИСЛОВOSTІ

У сучасній космецевтичній промисловості спостерігається стрімке зростання попиту на натуральні інгредієнти, особливо на ефірні олії, що обумовлює необхідність розробки надійних та стандартизованих методів оцінки їх якості, автентичності та безпеки. Дане дослідження представляє комплексний аналіз сучасних технологічних та біоматеріалознавчих підходів до контролю якості популярних ефірних олій, зокрема лавандової та чайного дерева, які широко застосовуються у косметичній, лікувально-профілактичній та фармацевтичній продукції.

Робота базується на вимогах сучасних європейських нормативних документів, зокрема регламенту CE 655/2013, який встановлює чіткі вимоги щодо надання науково обґрунтованих доказів ефективності, стабільності та безпеки косметичних інгредієнтів. Особливу увагу приділено проблемі фальсифікації ефірних олій, яка включає такі поширені методи як: розведення дешевшими рослинними оліями, часткову або повну заміну природних біоактивних сполук синтетичними аналогами, а також використання

технічних домішок для збільшення об'єму продукції. Результати досліджень виявили, що лавандова олія повністю відповідає вимогам міжнародного стандарту ISO 3515:2017 щодо хімічного складу та фізико-хімічних властивостей. На противагу цьому, у частині зразків олії чайного дерева було виявлено значні домішки соєвої олії, що суттєво суперечить вимогам стандарту ISO 4730:2017. Отримані результати демонструють високу ефективність запропонованого комплексного підходу, який поєднує передові хімічні, спектроскопічні та біологічні методи аналізу. Проведене дослідження має практичне значення для космецевтичної промисловості, пропонуючи алгоритм виявлення фальсифікованої продукції та підкреслюючи критичну важливість постійного моніторингу якості сировини на всіх етапах виробничого процесу. Результати роботи можуть стати основою для розробки нових, більш строгих стандартів контролю якості ефірних олій у косметичній, космецевтичній та фармацевтичній галузях, що сприятиме підвищенню безпеки та ефективності кінцевої продукції.

Ключові слова: контроль якості, ефірна олія лаванди, ефірна олія чайного дерева, жирнокислотний склад, ацилгліцериновий склад, хроматографічний профіль.

B. V. Putiatin, O. M. Blyzniuk, A. P. Belinska, S. V. Stankevych, A. O. Kariuk,
N. Yu. Kibenko

TECHNOLOGICAL AND BIOMATERIAL SCIENCE APPROACHES TO QUALITY ASSESSMENT OF ESSENTIAL OILS IN THE COSMECEUTICAL INDUSTRY

The modern cosmeceutical industry is experiencing rapid growth in demand for natural ingredients, particularly essential oils, necessitating the development of reliable and standardized methods for evaluating their quality, authenticity, and safety. This study presents a comprehensive analysis of contemporary technological and biomaterial science approaches to quality control of popular essential oils, specifically lavender and tea tree oil, which are widely used in cosmetic, therapeutic, and pharmaceutical products.

The research is based on the requirements of current European regulatory documents, particularly Regulation (EC) No 655/2013, which establishes clear guidelines for providing scientifically substantiated evidence of cosmetic ingredients' efficacy, stability, and safety. Special attention is given to the problem of essential oil adulteration, which includes common practices such as dilution with cheaper vegetable oils, partial or complete substitution of natural bioactive compounds with synthetic analogues, and the use of technical additives to increase product volume. The study revealed that lavender oil fully complies with the international standard ISO 3515:2017 regarding chemical composition and physicochemical properties. In contrast, some tea tree oil samples contained significant adulterants of soybean oil, substantially deviating from the requirements of ISO 4730:2017. The obtained results demonstrate the high efficiency of the proposed integrated approach, combining advanced chemical, spectroscopic, and biological analytical methods. This research holds significant practical value for the cosmeceutical industry by providing a scientifically validated algorithm for detecting adulterated products and emphasizing the critical importance of continuous quality monitoring throughout all stages of the production process. The findings may serve as a foundation for developing new, more stringent quality control standards for essential oils in cosmetic, cosmeceutical, and pharmaceutical applications, ultimately enhancing the safety and efficacy of final products.

Keywords: quality control, lavender essential oil, tea tree essential oil, fatty acid composition, acylglycerol composition, chromatographic profile.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

2'2025

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 09.06.2025 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,6. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–20.
Зам. № . Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХПІ»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.