

# ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

4'2024

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

Держвидання  
Свідоцтво Міністерства інформації України  
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.  
Свідоцтво 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. Арсенєва, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ ХНУМГ

В. С. Вєдь, д-р техн. наук, професор, професор каф. ІТПА НТУ "ХПІ"

П. О. Некрасов, д-р техн. наук, професор, зав. каф. ТЖПБ НТУ "ХПІ"

П. О. Качанов, д-р техн. наук, професор, зав. каф. АУТС 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

ХНУМГ

П. О. Капустенко, канд. техн. наук, професор, акад. Академії

будівництва України

Ференс Фридлер, PhD, professor, Pázmány Péter Katolikus

üniversitet, Budapest, Угорщина

Шарифа Рафидан Ван Алві, PhD, professor, Малайзійський університет

технології

Девид Дж. Кукулька, PhD, професор, Державний університет Нью-

Йоркського коледжу у Буффало, США

Євген Кеніг, д-р техн. наук, професор, Падерборнський університет,

Германія

Мартін Пікон-Нуньєс, PhD, professor, Університет Гуанахуато,

Мехіко

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 в бібліографічну базу 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., Kharkov National University of Municipal Economy named after O.M.

Beketova

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"

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

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

Eugeny Kenig, prof., dr.-ing., Paderborn University, Germany

Martín Picón Núñez, PhD, professor, university of Guanajuato,

Mexico

Petar Sabeв Varbanov, 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 ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

*Заруба Г. Г., Хмельнюк М. Г.*

Оптимізація вмісту R744 у сумішах з R290, R600, R600A, R170 для підвищення енергоефективності холодильної системи..... 3

*Кунденко М. П., Старіков В. В., Єгорова О. Ю., Пугачова Т. М.,*

*Кошельнік О. В., Білоус Д. Ю.*

Комбіновані сонячно-електричні системи теплотабезпечення..... 13

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

*Пономаренко Є. Д., Миронов А. М., Ільченко М. В., Горбунов К. О.,*

*Биканов С. М., Пономаренко Г. В., Соловей Л. В.*

Модифікований числовий метод визначення параметрів гідравлічних систем для розробки математичних моделей та інформаційних комплексів комп'ютерних імітаційних моделей промислових хімічних виробництв..... 22

*Аніпко О. Б., Бірюков І. Ю., Баулін Д. С., Муленко О. О.*

Раціональні терміни зберігання боєприпасів за умови мінімізації впливу на автоматичну зброю та її балістичні характеристики..... 33

*Кривобок Р. В., Пітак Я. М., Федоренко О. Ю., Волощук В. В.,*

*Чефранов Є. В., Гребенюк О. О., Тимченко О. Р.*

Вивчення реакцій обміну в системі SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>..... 47

## ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Алексахін О. О., Круглякова О. В., Бобловський О. В., Тютюник Л. І.*

Параметри теплообмінників гарячого водопостачання для теплових пунктів утеплених будівель при одноступінчастій схемі приєднання..... 59

*Пінчук В. О., Шарабура Т. А., Чемеринський М. С., Пінчук С. А.*

Ексергетичний аналіз процесів термічної переробки вугілля..... 67

*Аніпко О. Б., Баулін Д. С., Манжура С. А.*

Структура системи моніторингу стану нітроцелюлозних порохів у період їх зберігання між виробництвом та утилізацією..... 78

*Чемеринський М. С., Пінчук В. О., Шарабура Т. А.*

Вплив мікрохвильової активації вугілля на його петрографічні властивості..... 89

*Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Пономаренко Г. В., Назорний Е. Р.,*

*Пільник І. В., Рись В. Г.*

Визначення умов теплообміну при охолодженні високотемпературної поверхні..... 97

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

*Масікевич А. Ю., Лебедєв В. В., Горбунов К. О., Моїсєєв В. Ф.*

Сучасні та інноваційні технології навчання студентів медичних спеціальностей в області безпекових дисциплін та енергозбереження..... 104

*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..... 111

*Сторінка редколегії..... 122*

Затверджено Вченою радою НТУ «ХП» (протокол № 9 від 05.12.2024 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : Щоквартальний науково-практичний журнал. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХП», 2024. – № 4. – 124 с.

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

© Національний технічний університет «ХП», 2024

Г. Г. Заруба, аспірант, М. Г. Хмельнюк, д. техн. н., професор

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ R744 У СУМІШАХ З R290, R600, R600A, R170 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ

*Одеський національний технологічний університет, м. Одеса, Україна*

**Ключові слова:** бінарні суміші, R744, R290, R600, R600a, R170, енергоефективність, COP, об'ємна холодопродуктивність.

**Вступ і аналіз публікацій.** Енергозбереження та скорочення викидів стали актуальними темами на виконання вимог угоди COP28, яка підтвердила конкретну мету утримати зростання глобальної температури в межах 1.5 °C від рівня, що передував початку індустріальної ери, як зазначено в доповіді UNFCCC [1]. Для досягнення цієї мети необхідні ефективні заходи, спрямовані на стимулювання використання більш екологічно безпечних робочих речовин. Для вирішення цього питання одним з найпривабливіших підходів є використання природних холодоагентів. Особливого поширення набули вуглеводні, такі як R290, R1270, R600a і R600, а також діоксид вуглецю (R744) і аміак (R717). Їх привабливість досягається завдяки природному походженню і легкій доступності.

Вуглеводні, що використовуються як холодоагенти, мають чудові теплофізичні властивості, вони нетоксичні та екологічно чисті. Однак при виборі та проектуванні системи слід ретельно враховувати їхню горючість. R744, з іншого боку, також нетоксичний і екологічно чистий, не горить, легкодоступний і має високу об'ємну холодопродуктивність. Однак високий тиск і низька температура критичної точки обмежують його застосування [2].

Одним з можливих шляхів усунення існуючих недоліків представлених холодоагентів може бути отримання нового робочого тіла шляхом цілеспрямованого змішування двох або більше чистих холодоагентів. Змішування вуглеводнів з незаймистим R744 має дві переваги. По-перше, вища нижня межа займистості порівняно з чистими вуглеводнями розширює діапазон застосування холодоагенту. По-друге, деякі суміші характеризуються нижчим робочим тиском і, відповідно, вищою критичною точкою порівняно з чистим R744, що також розширює діапазон застосування холодоагенту. Однією з характеристик цих сумішей також буде змінна температура випаровування/конденсації. Крім того, порівняно з чистими вуглеводнями, суміш матиме вищу об'ємну холодопродуктивність.

Виявлено, що суміші демонструють хороші показники коефіцієнта перетворення (COP) та об'ємної холодопродуктивності ( $q_v$ ) у дослідженні Yelishala та ін. [3]. У дослідженні Niu та Zhang бінарна суміш R744/R290 (71/29 %) показала вищу холодопродуктивність і COP порівняно з R13 [4]. Fan та ін. (2014) теоретично проаналізували суміші R744/R600a і R744/R600, отримані сполуки 18/82 % для першої і 10/90 % для другої продемонстрували значне зростання COP та  $q_v$  для обох у порівнянні з R114, R123 і R142b [5]. Jemni та ін. дослідили суміші R744 з R1270, R290, R170 і R600a і виявили, що співвідношення 50/50 % покращує COP на 14 % для R744/R290 і на 36 % для R744/R1270 [6]. Nasruddin та ін. провели аналіз природних сумішей R744 з R290, R170 і R1150, визначивши оптимальні масові частки: 94/6 % для R744/R290, 64/36 % для

R744/R170 – і 37/63 % для R744/R1150 [7]. Ganesan та ін. підтвердили, що суміші R744/600 і R744/601 з масовим співвідношенням 5/95 % для обох збільшують COP на 20 % порівняно з використанням чистих робочих рідин [8]. Vassago та ін. встановили, що найкращі результати було отримано для суміші R744/R1270 з масовою часткою 77/23 %, яка підвищила COP на 28 % порівняно з чистим R744 [9].

**Методологія.** Визначення циклу та сумішей. Для теоретичного аналізу використовується проста одноступенева холодильна установка з ідеальним поршневим компресором, яка може працювати в до- і надкритичному циклі, як показано на рис. 1.

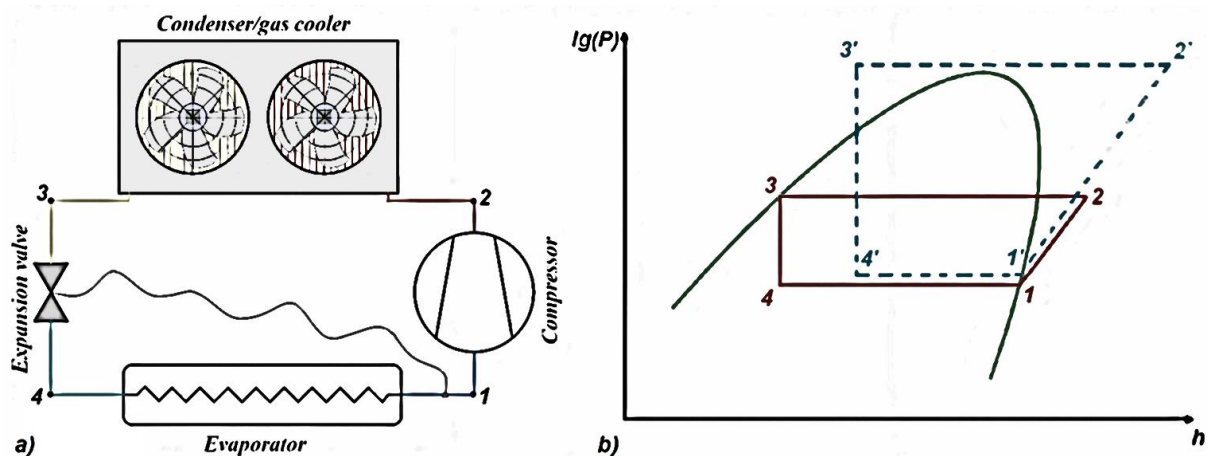


Рисунок 1 – а) Принципова схема ХУ; б) Холодильний цикл на діаграмі  $\lg(P)$ - $h$ : суцільна лінія – докритичний цикл; пунктирна лінія – надкритичний цикл

В якості досліджуваних холодоагентів були обрані бінарні суміші діоксиду вуглецю (R744) та вуглеводнів: пропану (R290), бутану (R600), ізобутану (R600a) та етану (R170). Вибір холодоагентів для дослідження був зроблений на основі можливості порівняння даних, які може надати математична модель, з експериментальними даними, отриманими Хмельнюком [10]. Основні властивості змішаних рідин були взяті з програми RefProp v.10.0, розробленої Lemmon та ін. [11], і наведені в табл. 1, де  $M$  – молярна маса,  $NBP$  – нормальна температура кипіння,  $P_{crit}$  і  $T_{crit}$  – тиск і температура в критичній точці.

Таблиця 1 – Основні властивості аналізованої речовин

Робоча речовина	$M$ , кг/кмоль	$NBP$ , °C	$P_{crit}$ , МПа	$t_{crit}$ , °C
R744	44.01	-78.464	7.3773	30.978
R290	44.096	-42.114	4.2512	96.74
R600	58.122	-0.49	3.796	151.98
R600a	58.122	-11.749	3.629	134.66
R170	30.069	-88.581	4.8722	32.172

Обчислювальна модель. Для спрощення моделювання були зроблені деякі припущення: перепади тиску всередині трубопроводів і теплообмінників відсутні; система працює в усталеному режимі; суміші не враховують вплив мастила на їх властивості; процес стиснення є ізентропійним. В даній роботі горючість кінцевої суміші не буде

враховуватися при виборі оптимального значення фракції R744. Для оцінки властивостей сумішей робочих рідин використовується програмний інструмент NIST Refprop 10.0 в інтегрованому середовищі розробки PyChart. Хоча отримання параметрів сумішей в Refprop може призвести до невеликих відхилень, порівняння експериментальних даних, наведених Хмельнюком [10], з даними, отриманими за допомогою Refprop, показало, що середньоквадратичне відхилення для всіх сумішей становить менше 5 %.

Таблиця 2 – Вихідні дані моделі

Символ	Опис	Значення
$t_h$	Температура відведення тепла / конденсації	30 °C
$t_0$	Температура випаровування	-30 °C

У табл. 2 наведено набір вхідних даних, необхідних для моделювання, який застосовується до всіх вищезазначених сумішей. Для того, щоб визначити максимальне значення COP для кожної з сумішей, модель змінює мольну частку R744 в суміші з точністю до 0.5 %. Цей процес дозволяє визначити оптимальний склад суміші для досягнення найвищого значення COP, що, в свою чергу, сприяє більш ефективній роботі системи.

Щоб знайти значення COP для конкретної суміші, ми оптимізуємо тиск тепловідведення ( $P_h$ ) і тиск випаровування ( $P_0$ ) за таких умов:

Для докритичного режиму приймаємо, що тиск  $P_h$  повинен відповідати значенню, за якого виконується умова рів. 1, як це рекомендує ASERCOM [12] у своєму керівництві.

$$\frac{T_2 + T_3}{2} = T_h, \quad (1)$$

де  $T_2$  і  $T_3$  – значення температури суміші на вході і виході з конденсатора відповідно.

Для надкритичного режиму приймаємо, що тиск  $P_h$  повинен відповідати значенню, при якому виконується умова рів. 2, коли середня температура тепловідведення в газоохолоджувачі дорівнює  $t_h$ .

$$COP = \max \left( \frac{q_0}{l_a} \right)_h. \quad (2)$$

Питома холодопродуктивність та робота стиснення компресора відповідно:

$$q_0 = h_1 - h_4, \quad (3)$$

$$l_a = h_2 - h_1, \quad (4)$$

де  $h_4$  і  $h_1$  – питома ентальпії суміші на вході і виході з випарника, відповідно;  $h_1$  та  $h_2$  – питома ентальпії суміші на вході та виході з компресора, відповідно.

За надкритичного режиму температура на виході з газоохолоджувача:

$$T_3 = T_h \cdot 2 - T_2. \tag{5}$$

Для всіх режимів роботи приймаємо, що тиск  $P_0$  повинен відповідати значенню, за якого виконується умова рів.6, як це рекомендує ASERCOM [12] у своєму керівництві.

$$\frac{T_4 + T_1}{2} = T_0, \tag{6}$$

де  $T_4$  і  $T_1$  – значення температури суміші на вході і виході з випарника відповідно.

Цей алгоритм виконується для кожного співвідношення масових часток вуглекислого газу і вуглеводнів, де коефіцієнт перетворення і об'ємна холодопродуктивність визначаються відповідно:

$$COP = \frac{q_0}{l_a}; \tag{7}$$

$$q_v = \frac{h_1 - h_4}{v_1}, \tag{8}$$

де  $v_1$  – значення питомого об'єму суміші на вході в компресор.

Значення параметрів у ключових точках, необхідні для наведених вище розрахунків, знайдені за допомогою стандартного методу побудови холодильних циклів.

Дана модель і методика оптимізації тисків кипіння та тепловідведення дозволяють знайти такі співвідношення компонентів суміші, що працюють в системах охолодження, які забезпечать оптимальну ефективність і продуктивність при одночасному зниженні енерговитрат.

**Результати та обговорення.** Використовуючи описану вище модель, було знайдено значення COP і  $q_v$  для кожного співвідношення компонентів у суміші при будь-якому режимі роботи. А також оптимальні значення молярних часток, які забезпечують максимальний COP. Результати розрахунків коефіцієнта перетворення та об'ємної холодопродуктивності сумішей наведені на рис. 2 та рис. 3.

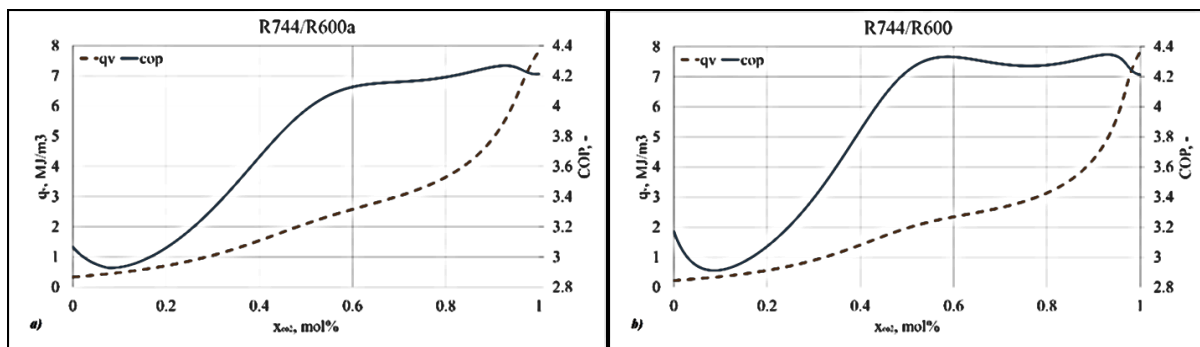


Рисунок 2 – Вплив молярної частки R744 ( $x_{CO_2}$ ) в суміші на COP (суцільна лінія) та  $q_v$  (пунктирна лінія): а) суміш R744/R600a; б) суміш R744/R600

При використанні суміші R744/R600a для будь-якого мольного співвідношення фракцій робочі цикли залишалися докритичними. На основі розрахунків було визначено, що оптимальною концентрацією в суміші є 93 % R744 і 7 % R600a. При такому співвідношенні COP на 39.2 % вище, ніж у чистого R600a, і становить 4.268 одиниць. При цьому об'ємна холодопродуктивність зростає в 16.8 разів і становить 5.613 МДж/м<sup>3</sup>.  $P_0$  в такій суміші зростає в 20.1 разів, а  $P_h$  – у 8 разів порівняно з чистим R600a. Спостережувані «вигини» і мінливість даних на цьому графіку та наступних пов'язані з особливостями оптимізації за середніми температурами процесів кипіння і конденсації, а також з властивостями сумішей.

Суміші R744/R600 з будь-яким мольним співвідношенням фракцій працюють в докритичних циклах. На отриманому графіку можна помітити два «піки» значень COP, які становлять 4.332 при мольній частці R744 58.5 % і 4.347 при мольній частці R744 93 %. Перший «пік» забезпечує дещо нижчі значення COP при збільшенні  $P_0$  в 10.3 разів і збільшенні  $P_h$  в 5.5 разів порівняно з чистим R600. Другий «пік», незважаючи на дещо вищий COP, має  $P_0$  у 28.2 рази і  $P_h$  у 10 разів більше відносно чистого R600. Через це пропонується обрати на суміші 58.5 % R744 і 41.5 % R600 через значно нижчі тиски, хоча і трохи менший COP, таке рішення дозволить заощадити на компресорі та його обслуговуванні, а також забезпечить більшу безпеку експлуатації системи. Однак, якщо потрібна більша пожежна безпека, суміш R744/R600 (93%/7%) може бути відмінним кандидатом. Суміш 58.5/41.5 % має COP на 36.6 % вищий, ніж чистий R600, а її об'ємна холодопродуктивність в 10.2 рази вища, ніж у чистого R600, і становить 2.296 МДж/м<sup>3</sup>.

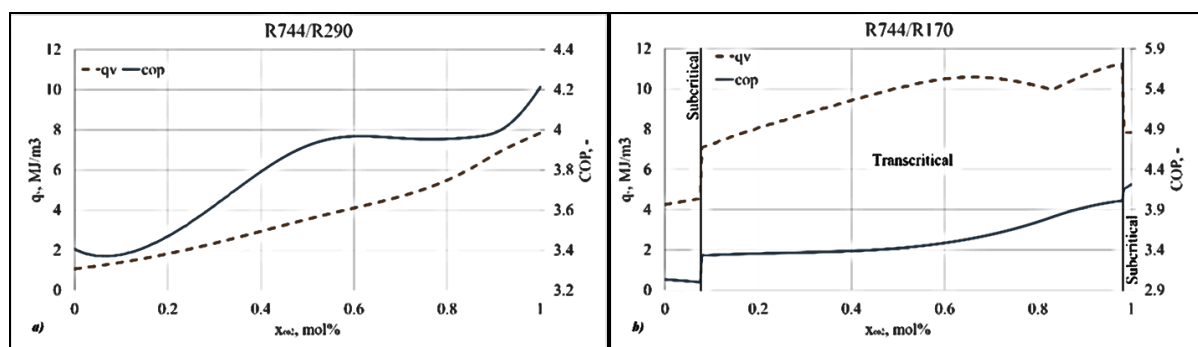


Рисунок 3 – Вплив молярної частки R744 ( $x_{CO_2}$ ) в суміші на COP (суцільна лінія) та  $q_v$  (пунктирна лінія): а) суміш R744/R290; б) суміш R744/R170

Суміш R744/R290, при будь-якому співвідношенні мольних часток, забезпечувала підкритичну роботу. На графіку показано, що при додаванні R744 до R290 COP зростає з 3.406 при нульовій концентрації R744 до 4.213 при стовідсотковій концентрації R744. На графіку можна спостерігати «плато» в межах молярної концентрації R744 приблизно від 55 % до 90 %, де значення COP коливається в районі 3.96 одиниць. Чистий R744 перевершує суміш як за COP, так і за об'ємною холодопродуктивністю. Однак є і недоліки: тиски, при яких працює R744, перевищують робочі тиски чистого R290 у 8.5 разів для  $P_0$  і 4.8 для  $P_h$ . Отримані дані свідчать про неефективність використання суміші R744/R290 в холодильній системі за даних умов.

На графіку суміші R744/R170 можна спостерігати декілька стрибків значень COP та об'ємної холодопродуктивності, що пов'язано з переходом між режимами роботи та з особливостями процесу оптимізації. Так, при молярній частці R744 від 0 % до 7,5 % цикл працює в докритичному режимі. Потім відбувається перехід в надкритич-

ний режим і від 8 % до 56.5 % спостерігається підвищення тиску  $P_h$  у результаті процесу оптимізації за максимальним значенням COP. Від молярної частки R744, що дорівнює 57 % до 83 %, спостерігається зниження тиску  $P_h$  також за рахунок оптимізації. Оскільки подальша максимізація COP вимагає подальшого зниження тиску  $P_h$ , а при значенні молярної частки R744 у 83 % досягається критичний тиск суміші, то наступні оптимальні тиски  $P_h$  сумішей дорівнюють критичним тискам до значення молярної частки R744, що дорівнює 98 %. Потім від 98.5 % до 100 % повертаємося до докритичного режиму роботи. У такому випадку використання суміші R744/R170 за даних умов є не ефективним, оскільки COP досягає максимального значення 4.213 для чистого R744, що на 39 % вище, ніж значення COP для чистого R170. В той же час, збільшення  $P_0$  і  $P_h$  залишається відносно незначним – в 1.3 і 1.2 рази, відповідно.

Таким чином, можна чітко бачити, що вибір оптимальної суміші холодоагентів залежить від конкретних вимог до системи, включаючи ефективність, безпеку та економічну вигоду. Це підкреслює важливість індивідуального підходу до кожного проекту та умов його експлуатації. Загалом, результати дослідження підкреслюють важливість оптимізації сумішей для максимізації ефективності холодильних циклів. Оптимальні співвідношення сумішей можуть бути використані для підвищення енергоефективності, а подальші дослідження можуть бути спрямовані на поглиблений аналіз впливу різних параметрів на продуктивність холодильних циклів з метою оптимізації їх роботи.

**Висновки.** Важливість дослідження альтернативних холодоагентів для вирішення екологічних проблем та підвищення енергоефективності холодильних систем неможливо переоцінити. У цьому контексті теоретичний аналіз бінарних сумішей на основі R744, описаний у цій статті, пропонує цінну інформацію про потенційних кандидатів для оптимізації холодильного циклу. Розглядаючи такі параметри, як коефіцієнт продуктивності (COP) та об'ємна холодопродуктивність ( $q_v$ ), дослідники прагнуть виявити композиції сумішей, які забезпечують кращу продуктивність, ніж окремі холодоагенти.

Серед досліджуваних сумішей, комбінації R744 (діоксид вуглецю) з вуглеводнями R600 (бутан) і R600a (ізобутан) виглядають перспективними варіантами. Оптимізовані молярні співвідношення 58.5/41.5 % для R744/R600 і 93/7 % для R744/R600a показують значне поліпшення COP, з відповідним збільшенням приблизно на 36.6 % і 39.2 % у порівнянні з чистими R600 і R600a. Крім того, об'ємна холодопродуктивність цих сумішей значно зростає, приблизно в 10.2 і 16.8 разів відповідно, що вказує на їх потенціал для створення ефективних охолоджувальних рішень.

Однак дослідження виявило обмеження, пов'язані з деякими складами сумішей. Наприклад, суміш R744/R290 працює гірше, ніж чистий R744, що вказує на те, що додавання R290 не дає очікуваних переваг. Аналогічно, суміш R744/R170 вважається не ефективною через нижчий показник COP порівняно з чистим R744. Крім того, суміш діоксиду вуглецю з етаном у переважній більшості співвідношень працювала в надкритичному режимі. Ці результати підкреслюють важливість ретельного підбору компонентів суміші для отримання максимального приросту продуктивності.

Таким чином, хоча суміші R744/R600 і R744/R600a є перспективними як альтернатива чистим R600 і R600a, необхідні подальші теоретичні дослідження, а також експериментальні випробування для підтвердження їх продуктивності за різних умов експлуатації. Вивчення та покращення потенціалу бінарних сумішей на основі R744 сприяє розвитку більш енергоефективних та екологічно стійких холодильних технологій.



Література

1. UN Climate Change Conference – United Arab Emirates // UNFCCC: [Веб-сайт]. Dubai, 2023. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/un-climate-change-conference-united-arab-emirates-nov/dec-2023/about-cop-28> (дата звернення: 09.09.2024).
2. Performance Analysis of CO<sub>2</sub>/Natural Refrigerants for Cascade Refrigeration System / Laguri V. та ін. // Зб. мат-в кон-цій / The sixth International Conference on Polygeneration. Сарагоса: Engineering Research Institute of the Universidad de Zaragoza, 2021. 219 С. 1–10.
3. Thermodynamic Study on Blends of Hydrocarbons and Carbon Dioxide as Zeotropic Refrigerants / Yelishala S. та ін. // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2020., вип. 8 Т. 142. С. 1–29.
4. Niu B., Zhang Y. Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures // International Journal of Refrigeration. 2007., вип. 1 Т. 30. С. 37-42.
5. Thermodynamic comparison of R744/R600A and R744/R600 used in mid-high temperature heat pump system / Fan X. W. та ін. // Thermal Science. 2014., вип. 5 Т. 18. С. 1655–1659.
6. Performance Investigation of Cascade Refrigeration System Using CO<sub>2</sub> and Mixtures / Jemni N. та ін. // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2015., вип. 3 Т. 23. 1550022.– С. 1–9.
7. Thermoeconomic Optimization of Cascade Refrigeration System Using Mixed Carbon Dioxide and Hydrocarbons at Low Temperature Circuit / Nasruddin N. та ін. // Makara Journal of Technology. 2016., вип. 3 Т. 20. С. 132–138.
8. Ganesan P., Eikevik T. M. New zeotropic CO<sub>2</sub>-based refrigerant mixtures for cascade high-temperature heat pump to reach heat sink temperature up to 180 °C // Energy Conversion and Management: X. 2023., Т. 20. 100407 С. 1–16.
9. Vaccaro G., Milazzo A., Talluri L. A proposal for a non-flammable, fluorine-free, CO<sub>2</sub>-based mixture as a low TEWI refrigerant // International Journal of Refrigeration. 2023., Т. 158. С. 158–163.
10. Хмельнюк М.Г. Смеси углекислоты с углеводородами как натуральные хладагенты холодильных машин // Холодильная техника и технология. 1998., вип. 59 Т. 92. С. 63–68.
11. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP Version 10.0 [Електронний ресурс]: Standard Reference Data Program / Lemmon E. W. та ін. / The National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 2018. Повна ліцензія.
12. Refrigerant Glide and Effect on Performances Declaration // ASERCOM: [Веб-сайт]. Брюссель, 2021. URL: <https://asercom.org/wp-content/uploads/2021/01/Refrigerant-Glide-and-Effect-on-Performances-Declaration.pdf> (дата звернення: 09.09.2024).

Bibliography (transliterated)

1. UN Climate Change Conference – United Arab Emirates // UNFCCC: [Veb-sayt]. Dubai, 2023. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/conferences/un-climate-change-conference-united-arab-emirates-nov/dec-2023/about-cop-28> (data zvernennya: 09.09.2024).
2. Performance Analysis of CO<sub>2</sub>/Natural Refrigerants for Cascade Refrigeration System / Laguri V. ta in. // Zb. mat-v kon-tsiy / The sixth International Conference on Polygener-

ation. Sarahosa: Engineering Research Institute of the Universidad de Zaragoza, 2021. 219 p. 1–10.

3. Thermodynamic Study on Blends of Hydrocarbons and Carbon Dioxide as Zeotropic Refrigerants / Yelishala S. ta in. // Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME. 2020., vip. 8 T. 142. P. 1–29.

4. Niu B., Zhang Y. Experimental study of the refrigeration cycle performance for the R744/R290 mixtures // International Journal of Refrigeration. 2007., vip. 1 T. 30. P. 37–42.

5. Thermodynamic comparison of R744/R600A and R744/R600 used in mid-high temperature heat pump system / Fan X. W. ta in. // Thermal Science. 2014., vip. 5 T. 18. P. 1655–1659.

6. Performance Investigation of Cascade Refrigeration System Using CO<sub>2</sub> and Mixtures / Jemni N. ta in. // International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration. 2015., vip. 3 T. 23. 1550022 P. 1–9.

7. Thermoeconomic Optimization of Cascade Refrigeration System Using Mixed Carbon Dioxide and Hydrocarbons at Low Temperature Circuit / Nasruddin N. ta in. // Makara Journal of Technology. 2016., vip. 3 T. 20. P. 132–138.

8. Ganesan P., Eikevik T.M. New zeotropic CO<sub>2</sub>-based refrigerant mixtures for cascade high-temperature heat pump to reach heat sink temperature up to 180 °C // Energy Conversion and Management: X. 2023., T. 20. 100407 P. 1–16.

9. Vaccaro G., Milazzo A., Talluri L. A proposal for a non-flammable, fluorine-free, CO<sub>2</sub>-based mixture as a low TEWI refrigerant // International Journal of Refrigeration. 2023. T. 158. P. 158–163.

10. Khmel`nyuk M. H. Smesi uhlekisloty s uhlevodorodami kak natural`nye khladahenty kholodil`nykh mashin // Kholodil`naya tekhnika i tekhnolohiya. 1998., vip. 59 T. 92. P. 63–68.

11. Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP Version 10.0 [Elektronniy resurs]: Standard Reference Data Program / Lemmon E. W. ta in. / The National Institute of Standards and Technology. Gaithersburg, 2018. Povna litsenziia.

12. Refrigerant Glide and Effect on Performances Declaration // ASERCOM: [Veb-sayt]. Bryussel`, 2021. URL: <https://asercom.org/wp-content/uploads/2021/01/Refrigerant-Glide-and-Effect-on-Performances-Declaration.pdf> (data zvernennya: 09.09.2024).

УДК 621.564

Г. Г. Заруба, аспірант, М. Г. Хмельнюк, д. т. н., професор

### **ОПТИМІЗАЦІЯ ВМІСТУ R744 У СУМІШАХ З R290, R600, R600A, R170 ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНОЇ СИСТЕМИ**

У даній роботі здійснено загальний теоретичний аналіз бінарних сумішей холодоагентів на основі R744 (вуглекислий газ) у поєднанні з певними вуглеводнями, зокрема R290 (пропан), R600 (бутан), R600a (ізобутан) та R170 (етан). Основною метою дослідження було визначення оптимальних мольних співвідношень для кожної з сумішей, що забезпечують максимізацію коефіцієнта перетворення (COP) – показника, який характеризує енергоефективність системи охолодження. Крім того, було проведено

аналіз об'ємної холодопродуктивності ( $q_v$ ), що є важливим критерієм для оцінки загальної ефективності роботи холодильних систем.

В рамках дослідження проаналізовано роботу холодильних систем з урахуванням як докритичних, так і надкритичних режимів. У якості початкових параметрів для побудови математичної моделі використовувалися температури кипіння та конденсації/відведення тепла, що визначалися як середні значення температур процесів у теплообмінних апаратах. Такий підхід дозволив забезпечити точне підтримання заданої температури в холодильній камері.

Найкращі результати були отримані для сумішей R744/R600 та R744/R600a. R744/R600 за пропорції 58.5/41.5 % має COP на 36.6 % вищий, ніж у чистого R600, а об'ємна холодопродуктивність збільшилася у 10,2 раза. Аналогічні успішні результати продемонструвала суміш R744/R600a з оптимальним співвідношенням 93/7 %, що показала приріст COP на 39.2 % та збільшення об'ємної холодопродуктивності у 16.8 раза порівняно з чистим R600a.

Проте, дослідження показало, що використання суміші R744/R290 виявилось менш ефективним через порівняно нижчі показники COP та об'ємної холодопродуктивності порівняно з чистим R744. Подібні висновки були зроблені для суміші R744/R170, яка також продемонструвала нижчу ефективність порівняно з чистим R744. Водночас зазначено, що в більшості співвідношень компонентів суміш працює в надкритичному режимі. Це свідчить про недоцільність застосування таких сумішей холодоагентів за заданих вихідних параметрів для підвищення енергоефективності. Даний результат підкреслює важливість ретельного підбору компонентів сумішей для досягнення оптимальних показників.

Загалом результати дослідження демонструють, що використання сумішей R744 з R600 і R600a може стати перспективною альтернативою для підвищення енергоефективності холодильних систем. Оптимізація молярних часток дозволяє досягти значного покращення COP і суттєвого збільшення об'ємної холодопродуктивності, що робить такі суміші перспективними кандидатами для практичного застосування. Однак, для остаточного підтвердження цих висновків потрібна подальша розробка поглибленої математичної моделі, що буде наближена до реальних умов експлуатації, а також проведення експериментальних досліджень, що дозволять перевірити фактичні показники ефективності цих сумішей і виявити можливі обмеження їх використання.

**Ключові слова:** бінарні суміші, R744, R290, R600, R600a, R170, енергоефективність, COP, об'ємна холодопродуктивність.

H. H. Zaruba, PhD student, M. H. Khmelniuk, D.Sc, professor

### **OPTIMIZATION OF R744 CONTENT IN MIXTURES WITH R290, R600, R600A, R170 TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE REFRIGERATION SYSTEM**

This paper presents a general theoretical analysis of binary refrigerant blends based on R744 (carbon dioxide) in combination with certain hydrocarbons, including R290 (propane), R600 (butane), R600a (isobutane), and R170 (ethane). The main goal of the study was to determine the optimal molar ratios for each of the mixtures that maximize the coefficient of performance (COP), an indicator that characterizes the energy efficiency of the cooling system.

In addition, the volumetric cooling capacity ( $qv$ ) was analyzed, which is an important criterion for assessing the overall efficiency of refrigeration systems.

The study analyzed the operation of refrigeration systems, taking into account both subcritical and supercritical conditions. As initial parameters for building a mathematical model, the boiling and condensation/heat removal temperatures were used, which were determined as the average values of the process temperatures in heat exchangers. This approach ensured accurate maintenance of the set temperature in the refrigerating chamber.

The best results were obtained for R744/R600 and R744/R600a blends. R744/R600 in the proportion of 58.5/41.5 % has a COP 36.6 % higher than that of pure R600, and the volumetric cooling capacity increased by 10.2 times. Similarly successful results were demonstrated by the R744/R600a blend with an optimal ratio of 93/7 %, which showed a 39.2 % increase in COP and a 16.8-fold increase in volumetric cooling capacity compared to pure R600a.

However, the study showed that the use of a R744/R290 blend was less efficient due to relatively lower COP and volumetric cooling capacity compared to pure R744. Similar conclusions were drawn for the R744/R170 blend, which also demonstrated lower efficiency compared to pure R744. At the same time, it is noted that in most component ratios, the mixture operates in a supercritical mode. This indicates that it is inexpedient to use such refrigerant blends at the given initial parameters to improve energy efficiency. This result emphasizes the importance of careful selection of blend components to achieve optimal performance.

Overall, the study results demonstrate that the use of R744 blends with R600 and R600a can be a promising alternative to improve the energy efficiency of refrigeration systems. Optimization of the molar fractions can achieve a significant improvement in COP and a significant increase in volumetric cooling capacity, making such blends promising candidates for practical use. However, further development of an in-depth mathematical model that will be close to real operating conditions, as well as experimental studies to verify the actual performance of these blends and identify possible limitations of their use, are required to confirm these conclusions.

**Keywords:** binary mixtures, R744, R290, R600, R600a, R170, energy efficiency, COP, volumetric cooling capacity.

М. П. Кунденко, д. техн. н., професор, В. В. Старіков, д. фіз.-мат. н., професор,  
О. Ю. Єгорова, к. техн. н., доцент, Т. М. Пугачова, к. техн. н., професор,  
О. В. Кошельнік, к. техн. н., доцент, Д. Ю. Білоус, аспірант

## КОМБІНОВАНІ СОНЯЧНО-ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Ключові слова:** сонячний колектор, світлопоглинальне покриття, джерело, теплоносії, інфрачервоне випромінювання, геліосистема, опалення.

**Постановка проблеми.** В останні роки енергія Сонця розглядається як високо-ефективне додаткове джерело, яке у найближчі 10–15 років може дати значну частку енергії, необхідної людству. Цим пояснюється збільшення кількості досліджень з геліо-енергетики у більшості розвинених країн світу.

Можливість ефективного використання сонячного випромінювання завжди займала людство, але конкретне здійснення обмежувалося технічними можливостями виготовлення складних конструкцій та низькою ефективністю перетворення світлової енергії на теплову або електричну. Однак через зростання цін на нафту і паралельно цьому на інші енергоносії увага до використання сонячної енергії постійно зростає. Крім того, при використанні сонячної енергії не відбувається забруднення навколишнього середовища [1].

Сонячну енергію можна використовувати навіть у країнах із малою інсоляцією. Наприклад, у Німеччині у наступний час існує велика кількість опалювальних та нагрівальних пристроїв, до складу яких входять у тому числі сонячні енергетичні установки, навіть в північних районах країни, де сонячне опромінення не таке сильне. Серед інших пристроїв особливу популярність мають сонячні водонагрівачі, їх також називають сонячними колекторами, які використовують енергію сонця для нагрівання води. Вони працюють без джерела електроенергії. Сонячний водонагрівач може використовуватися для душу, гарячого водопостачання кухні, і, залежно від розміру, для обігріву будинку. Отже, інші види палива та ресурси, які досі використовувалися для нагрівання води, можуть бути заощаджені. Сонячні нагрівачі широко застосовуються у країнах із високим сонячним опроміненням та холодними зимами. Вони використовуються повсюдно, але особливо активно у сільських та гірських регіонах, де мають місце перебої в енергопостачанні.

**Мета:** Розробка ефективних комбінованих сонячно-електричних систем теплопостачання, які поєднують використання сонячної енергії, інфрачервоного нагріву та традиційних джерел енергії для підвищення продуктивності, енергоефективності та екологічної безпеки систем тепловодозабезпечення.

**Аналіз попередніх досліджень.** Для оцінки можливостей сонячної енергетики вважають, що середня щільність потоку сонячної радіації поза атмосферою Землі дорівнює  $1.4 \text{ кВт/м}^2$ , але на рівні океану на екваторі опівдні  $1 \text{ кВт/м}^2$  [1]. Дієвість використання сонячної енергії залежить від географічного розташування, від пори року та по-

годних умов [2]. Тому кількість енергії, що приймається на  $1 \text{ м}^2$  дуже мінлива. Загальна потужність сонячної радіації, яку перехоплює наша планета, становить  $1,7 \cdot 10^{14}$  кВт. Це колосальна потужність, що приблизно в 500 разів перевищує граничні потреби людської цивілізації, що становлять  $3 \cdot 10^{11}$  кВт. Якщо оцінити всю сонячну енергію, яку наша планета отримує за один рік, то вона складе 1018 кВт. год, що приблизно в 10 разів більше енергії всіх розвіданих і нерозвіданих копалин, включаючи і речовини, що розщеплюються. Сонячна енергетика доступна повсюдно і це екологічно чисте джерело енергії, що дозволяє використовувати його в масштабах, що постійно зростають, без негативного впливу на навколишнє середовище.

Основними напрямками використання сонячної енергії вважаються: пряме перетворення сонячної енергії на електричну; отримання тепла шляхом абсорбції сонячного випромінювання.

Останній напрямок, пов'язаний з виробництвом низькотемпературного тепла можна здійснити за допомогою теплових колекторів [3], які перетворюють сонячне випромінювання на теплову енергію. Сонячний колектор – це ефективна енергозберігаюча технологія, яка при правильному монтажі та експлуатації може на 50–80 % скоротити витрати на опалення та приготування гарячої води. Найбільш ефективно сонячний колектор працює влітку (для підігріву води), а також навесні та восени (в режимі опалення). Його зазвичай використовують як додаткове джерело обігріву, в зимовий час геліосистема може забезпечити комфортні умови проживання лише за якісного виконання теплоізоляції будинку та встановлення системи достатньої потужності. Чим більше площа будинку, тим більше буде потрібна потужність сонячного колектора, тим більшу площу він займатиме.

**Виклад основного матеріалу.** Так як основна інтенсивність сонячного випромінювання в наземних умовах знаходиться в спектральному інтервалі  $0,4 \text{ мкм} - 1,8 \text{ мкм}$ , то як прозорий верхній шар використовується звичайне скло. Коефіцієнт пропускання скла у цьому спектральному діапазоні досягає 95 %. Розташований у нижній частині колектора, теплоприймач є абсорбуючим покриттям з коефіцієнтом поглинання сонячного випромінювання до 90 %. Поглинаючи пряме сонячне випромінювання, це абсорбуюче покриття навіть без верхнього скла може нагріватися залежно від потужності падаючого випромінювання до  $150 - 200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Нагріте до таких температур тіло випромінює теплову енергію, основна потужність якого знаходиться в інфрачервоному діапазоні.

Ефективність сонячного колектора може бути суттєво збільшена при використанні на теплоприймальній поверхні селективних поглинаючих покриттів, які мають властивість ефективно поглинати видиму частину сонячного спектру і практично не випромінювати енергію в інфрачервоній області спектра [4–7].

Існує чимало різноманітних типів світлопоглинальних покриттів як на основі органічних, так і неорганічних матеріалів. Серед органічних матеріалів найчастіше використовуються чорні фарби та лаки. Такі покриття мають достатньо високу ефективність, низьку собівартість, але з часом розвиток деградаційних процесів за рахунок низької стійкості органіки до дії світла та термічного навантаження суттєво погіршує їх оптичні характеристики. Серед неорганічних покриттів найбільшого поширення у серійному виробництві набули покриття, сформовані шляхом електрохімічної обробки поверхні сталі та деяких сплавів кольорових металів. Однак, такі чорні мають ряд істотних недоліків, до яких належать: екологічно шкідливе виробництво, низька ефектив-

ність теплового поглинання сонячної енергії і, відповідно, низьке значення ККД, та ін. Деякі інші типи покриттів (текстуровані поверхні, багат шарові напівпровідникові структури та ін.) при високих оптичних характеристиках та стабільності параметрів у часі мають достатньо складну технологію виготовлення, що підвищує собівартість [4, 7, 8].

Альтернативою існуючим світлопоглинальним покриттям у сонячних колекторах можуть бути селективні покриття на основі низьковакуумних конденсатів алюмінію. З цього приводу найбільш цікавими є покриття, що виготовляються з використанням вакуумних технологій, коли за рахунок примусового підвищення тиску на підкладку осаджується комбінований кластерний та молекулярний потоки речовини. Вибір у якості матеріалу для низьковакуумного покриття алюмінію додає переваг цій технології, бо алюміній має досить низьку температуру плавлення, а кероване утворення на поверхні плівки, що осаджується, оксидних фаз суттєво підвищує корозійну стійкість покриття [9].

Синтез світлопоглинальних покриттів на основі низьковакуумного конденсату алюмінію виявив, що вони, завдяки наявності лабіринту відкритих мікро- і субмікропор (загальний обсяг пор у таких об'єктах може досягати 50 %) з широким розподілом за розмірами мають гранично високі значення коефіцієнта поглинання ( $A_s > 0,95$ ) в діапазоні довжин хвиль видимої та інфрачервоної області спектру, наближаючи цей матеріал за оптичними властивостями до абсолютно чорного тіла. При певній товщині та умовах виготовлення низьковакуумні конденсати алюмінію набувають властивості селективності, коли поряд з високою поглинаючою здатністю у видимій області спектру ( $\lambda = 0,4-0,7$  мкм) спостерігаються низькі значення коефіцієнта випромінювальної здатності – ступеня чорноти ( $\epsilon < 0,20$ ) в області власного теплового випромінювання ( $\lambda = 4-60$  мкм при 300 К). Саме це забезпечує їх високу ефективність для використання у сонячних колекторах для перетворення світла на тепло. Стабільність оптичних параметрів таких покриттів забезпечується вихідною високодефектною поверхневою структурою [9]. Покриття такого типу можуть підвищити ККД сонячного колектора на 18–22 %.

Інтенсивність сонячного випромінювання в зимовий період, а в деяких випадках у весняний та осінній періоди, є недостатньою для забезпечення необхідною потужністю систем тепловодозабезпечення з геліоколекторами [10]. Для покриття навантажень у цій період потрібен сезонний накопичувач сонячної енергії великої ємності. Витрати, пов'язані із встановленням даного накопичувача, значно збільшують вартість геліосистеми та строк її окупності. Тому ці накопичувачі не отримали широкого поширення.

У таких випадках дані системи доцільно обладнувати додатковими джерелами енергії – електрокотлами або котлами на органічному викопному паливі. Враховуючи сучасні тенденції на загальне зменшення енергоспоживання та відмову від використання органічного палива, доцільним буде застосування в таких системах додаткових джерел енергії, які мінімізують питомі витрати енергії на догрівання енергоносія та є екологічно чистими. Для цього пропонується встановлення інфрачервоного котла.

Аналізуючи експериментальні та теоретичні залежності, отримані під час проведення досліджень камер ІЧ-нагріву з різною геометрією опромінення, ставиться завдання покращити технологічну надійність, продуктивність, раціональне використання енергоносіїв, високі техніко-експлуатаційні та малогабаритні показники.

Поставлена задача вирішується так. Установа для нагріву теплоносія, до складу якого входить циліндричний вертикальний корпус, верхня і нижня кришка, ІЧ нагрівників у вигляді прозорої для ІЧ променів трубки, усередині якої знаходиться ІЧ нагрівник, виконаний у вигляді спіралі, деталі кріплення і елементи ущільнення, вихідний патрубок, циркуляційний насос, блок живлення, додатково забезпечений кільцевою камерою, концентрично розташованою усередині циліндричного вертикального корпусу з зазором, утворюючи периферійний об'єм, в якому на 0.5...0.55 висоти кільцевої камери розташована звита в спіраль трубка змійовика, вхідний кінець якої закріплений в отворі нижньої кришки і з'єднаний з вихідним штуцером циркуляційного насоса, а вихідний – герметично закріплений в отворі дна кільцевої камери, при цьому у внутрішньому об'ємі кільцевої камери розміщений блок ІЧ -нагрівачів, в вигляді пучка трубок, консольно закріплених в отворах верхньої кришки, центри яких розміщені в вершинах та в центрі шестикутника вписаного в коло верхньої кришки, діаметром  $d_{\text{кола}} \leq (D_{\text{кільц.кам.}} - 2d_{\text{труб}})$ , з можливістю синхронного ексцентричного зміщення кожної з трубок блока ІЧ -нагрівачів в вертикальній площині відносно повздовжньої осі кільцевої камери, крім того у внутрішньому об'ємі кільцевої камери послідовно один над одним розміщено пакет перфорованих турбулізаторів, закріплених на зубоподібних виступах, рівномірно розподілених по внутрішньому периметру кільцевої камери в горизонтальній площині, при цьому в зазорі над змійовикові трубкою розміщено пакет кільцевих перфорованих перемішувачів, внутрішні кромки яких щільно прилягають до зовнішньої поверхні кільцевої камери, а зовнішні кромки – до внутрішньої поверхні циліндричного корпусу. крім того, вузли з'єднання затискачів і трубок блока ІЧ -нагрівачів, винесені з робочої зони корпусу і розташовані в повітряному проміжку, утвореному верхньою кришкою і верхньою кромкою кільцевої камери [11].

При цьому внутрішня поверхня циліндричного вертикального корпусу, верхньої і нижньої кришки покриті шаром термостійкого електроізоляційного матеріалу індиферентного до кислого середовища при температурі 100-150°C. Для синхронізованої зміни ексцентриситету трубок блока ІЧ -нагрівачів, пристрій забезпечений центральним приводом, закріпленим на верхній кришці, при чому трубки блока ІЧ -нагрівачів виготовлені у вигляді урізаного конуса оберненого більшою основою до верхньої кришки, а крок навивки спіралей ІЧ -нагрівачів виконаний зменшеним в напрямку більшої основи трубок, починаючи з 0,5...0,6 висоти останніх [11].

Основною задачею запропонованої установки, є більш ефективно використовувати енергоносії. Це стає можливим за рахунок більш раціонального поєднання традиційної енергетики (живлення від мережі) і використання вторинних енергоресурсів; активної турбулізації маси теплоносія, що подається циркуляційним насосом у внутрішній об'ємі кільцевої камери; винесення вузлів з'єднання затискачів і трубок ІЧ-нагрівача в неробочий повітряний проміжок між верхньою кришкою і верхньою кромкою кільцевої камери; регулювання температури нагріву за рахунок зміни ексцентриситету блока трубок з ІЧ-нагрівачами; вирівнювання градієнтів температурного поля у внутрішньому об'ємі кільцевої камери; можливості регулювання продуктивності нагрівальної установки, підвищення технологічної надійності; уніфікації елементів і режимів нагріву; можливість живлення від мережі і нетрадиційних джерел [12].

Для використання отриманого в геліоколекторах енергетичного потенціалу теплоносія доцільно застосовувати для систем опалення та гарячого водопостачання дво-



контурну схему з примусовою циркуляцією. Перший контур містить у собі блок сонячних колекторів, циркуляційний насос і розширювальний бак, що дозволяє компенсувати теплове розширення теплоносія. Другий контур, де циркулює мережна вода, складається з бака-акумулятора і додаткового електричного водонагрівача [13].

В геліосистемах, які забезпечують значну кількість споживачів, доцільно застосовувати системи з двома акумуляторами, що з'єднуються паралельно. У першому акумуляторі відбувається попередній нагрів теплоносія за рахунок сонячної енергії, а в другому здійснюється догрівання теплоносія за рахунок традиційних джерел тепла (електричний підігрівач). Обидва акумулятора з'єднуються між собою циркуляційним трубопроводом. При високій інтенсивності сонячної енергії необхідність застосування додаткових джерел енергії відсутня.

Якщо геліосистеми використовуються одночасно для опалення та гарячого водопостачання, то застосовуються два окремих теплових накопичувача для води системи водопостачання та води системи опалення. Але в більшості випадків такі системи опалення можливо використовувати як додаткові із-за недостатньої інтенсивності сонячного випромінювання [14].

Перевагою таких схем є можливість застосування в першому контурі теплоносіїв, що не замерзають при низьких температурах. У разі необхідності може бути запропонована комбінована схема, що поєднує сонячну водонагрівальну установку і тепловий дублер – паливний водогрійний котел, де у якості джерела енергії можуть бути використані пелети або інші види органічного палива. Тут передбачена можливість нагрівання живильної води, що подається в котел, за рахунок сонячної енергії. Блок керування забезпечує узгодження потужностей джерел енергії та теплових навантажень системи [15].

Також можливо розглядати варіант системи опалення з тепловим багат шаровим акумулятором. Тут використовується різниця у густині гарячої та холодної води. За рахунок цього у верхній частині акумулятора можливо забезпечити відбір гарячої води набагато більший час, ніж у змішаних накопичувачах. З метою запобігання зберігання окремого шару гарячої та холодної води, подача води в накопичувач та її відбір здійснюється на різних рівнях. Керування такою системою здійснюється за допомогою системи автоматики.

### **Висновки**

Запропонована комбінація геліосистеми та інфрачервоного нагрівача дозволяє значно підвищити ефективність використання енергоресурсів для систем теплопостачання. Інфрачервоний нагрівач компенсує нестачу теплової енергії під час періодів низької інтенсивності сонячного випромінювання (зимовий та міжсезонний періоди), забезпечуючи стабільну температуру теплоносія.

Інтеграція ПЧ-нагрівача з геліоколектором сприяє:

1. **Раціональному використанню енергоносіїв:** комбінування сонячної енергії та ПЧ-нагрівача знижує питомі витрати енергії на нагрів.

2. **Екологічності:** ПЧ-нагрівач використовує електроенергію без спалювання органічного палива, що зменшує викиди CO.

3. **Гнучкості:** регулювання температури та ексцентриситету ПЧ-нагрівача дозволяє адаптувати систему до змінних теплових навантажень.

**4. Універсальності:** така система підходить як для опалення, так і для гарячого водопостачання.

Таким чином, поєднання геліосистеми та інфрачервоного нагрівача забезпечує енергоефективне, екологічно чисте та надійне рішення для сучасних систем теплопостачання.

#### Література

1. Cui T., Xuan Y., Li Q. Technical and economic analysis of integrating low-medium temperature solar energy into power plant. *Energy Conversion & Management*. 2016. Vol. 112. P. 459-469. doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.037.
2. Степанова Н.Д. Економічний та екологічний аспекти теплопостачання на базі геліоустановок. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2013. №5. С. 65–68.
3. Попель О.С. Порівняльний аналіз показників конструкцій сонячних колекторів зарубіжного і вітчизняного виробництва. *Нові технічні рішення. Теплоенергетика*. 2006. № 3. С. 23–29.
4. Rinnerbauer V., Lausecker E., Schäffler F., Reininger P., Strasser G., Geil R. D., et al. Nanoimprinted Superlattice Metallic Photonic crystal as Ultrasensitive Solar Absorber. *Optica*. 2015. Vol. 2, no. 8. P. 743-746. doi:10.1364/optica.2.000743.
5. Li Y., Lin C., Zhou D. Scalable All-Ceramic Nanofilms as Highly Efficient and Thermally Stable Selective Solar Absorbers. *Nano Energy*. 2019. Vol. 64. P. 103947.
6. Cao F., Mcenaney K., Chen G., Ren Z. A Review of Cermet-Based Spectrally Selective Solar Absorbers. *Energy Environ. Sci*. 2014. Vol. 7, no. 5. P. 1615–1627. doi:10.1039/c3ee43825b.
7. Chou J.B., Yeng Y.X., Lee Y.E., Lenert A., Rinnerbauer V., Celanovic I., et al. Enabling Ideal Selective Solar Absorption with 2D Metallic Dielectric Photonic Crystals. *Adv. Mater*. 2014. Vol. 26, no. 47. P. 8041-8045. doi:10.1002/adma.201403302.
8. El-Mahallawy N., Atia M. R. A., Khaled A., Shoeib M. Design and Simulation of Different Multilayer Solar Selective Coatings for Solar thermal Applications. *Mater. Res. Express*. 2018. Vol. 5, no. 4. P. 046402. doi:10.1088/2053-1591/aab871.
9. Starikov V. Light-absorbing inorganic coatings for solar and optoelectronic elements. 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Istanbul, Turkey, 2020. P. 154-157. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263163.
10. Venhryn, Iryna, Shapoval, Stepan, Zhelykh, Vasyi, Kozak, Khrystyna, Gulai, Bogdan. (2022). Heat supply of buildings with environmentally friendly sources using solar energy. *Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply*. 41. 18-23. 10.32347/2409-2606.2022.41.18–23.
11. Кунденко М.П., Романченко М.А. Пастеризатор: патент на винахід. №47070, 17.06.2002, бюл. № 6/2002.
12. Єгоров, О. Б Analysis of structures and methods of calculations of solar collectors as an alternative source of heat energy., О. Б Єгоров, О. Ю Єгорова, Я. Б Форкун, / *Світлотехніка та електроенергетика*// 2017 (3), с. 31–35.

13. Blikharskyy, Z., Koszelnik, P., Mesaros, P. (eds) Proceedings of CEE 2019. CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 47. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_65).

14. Дорошенко, О., Халак, В., Дем'яненко, Ю. (2020). Оптимізація й прогнозування ефективності рідинних сонячних колекторів у складі систем гарячого водопостачання. Refrigeration Engineering and Technology, 56(1-2), 37-43. <https://doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1827>.

15. Схеми об'язування твердопаливного котла URL: <https://centr-tepla.com.ua/ua/skhemy-obv'iazky-tverdotoplyvnoho-kotla/> (дата звернення: 16.11.2024).

#### Bibliography (transliterated)

1. Cui T., Xuan Y., Li Q. Technical and economic analysis of integrating low-medium temperature solar energy into power plant. Energy Conversion & Management. 2016. Vol. 112. P. 459-469. doi: 10.1016/j.enconman.2016.01.037.

2. Stepanova N.D. Ekonomichnyi ta ekolohichniy aspekty teplopostachannia na bazi helioustanovok. Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. 2013. №5. P. 65–68.

3. Popel O.S. Porivnialnyi analiz pokaznykiv konstruksii soniachnykh kolektoriv zarubizhnoho i vitchyznianoho vyrobnytstva. Novi tekhnichni rishennia. Teploenerhetyka. 2006. № 3. P. 23–29.

4. Rinnerbauer V., Lausecker E., Schäffler F., Reininger P., Strasser G., Geil R. D., et al. Nanoimprinted Superlattice Metallic Photonic crystal as Ultrasensitive Solar Absorber. Optica. 2015. Vol. 2, no. 8. P. 743-746. doi:10.1364/optica.2.000743.

5. Li Y., Lin C., Zhou D. Scalable All-Ceramic Nanofilms as Highly Efficient and Thermally Stable Selective Solar Absorbers. Nano Energy. 2019. Vol. 64. P. 103947.

6. Cao F., Mcenaney K., Chen G., Ren Z. A Review of Cermet-Based Spectrally Selective Solar Absorbers. Energy Environ. Sci. 2014. Vol. 7, no. 5. P. 1615-1627. doi:10.1039/c3ee43825b.

7. Chou J. B., Yeng Y. X., Lee Y. E., Lenert A., Rinnerbauer V., Celanovic I., et al. Enabling Ideal Selective Solar Absorption with 2D Metallic Dielectric Photonic Crystals. Adv. Mater. 2014. Vol. 26, no. 47. P. 8041-8045. doi:10.1002/adma.201403302.

8. El-Mahallawy N., Atia M. R. A., Khaled A., Shoeib M. Design and Simulation of Different Multilayer Solar Selective Coatings for Solar thermal Applications. Mater. Res. Express. 2018. Vol. 5, no. 4. P. 046402. doi:10.1088/2053-1591/aab871.

9. Starikov V. Light-absorbing inorganic coatings for solar and optoelectronic elements. 2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS). Istanbul, Turkey, 2020. P. 154-157. doi: 10.1109/IEPS51250.2020.9263163.

10. Venhryn, Iryna, Shapoval, Stepan, Zhelykh, Vasyl, Kozak, Khrystyna, Gulai, Bogdan. (2022). Heat supply of buildings with environmentally friendly sources using solar energy. Ventilation, Illumination and Heat Gas Supply. 41. 18–23. 10.32347/2409-2606.2022.41.18–23.

11. Kundenko M.P., Romanchenko M.A. Pasteryzator: patent na vynakhid. №47070, : 17.06.2002, biul. № 6/2002.

12. Yehorov, O.B Analysis of structures and methods of calculations of solar collectors as an alternative source of heat energy., O. B Yehorov, O. Yu Yehorova, Ya. B Forkun./ Svitlotekhnika ta elektroenerhetyka// 2017 (3), P. 31–35.

13. Blikharsky, Z., Koszelnik, P., Mesaros, P. (eds) Proceedings of CEE 2019. CEE 2019. Lecture Notes in Civil Engineering , vol 47. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7\\_65](https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_65).

14. Doroshenko, O., Khalak, V., Demianenko, Yu. (2020). Optymizatsiia y prohnozuвання efektyvnosti ridynnykh soniachnykh kolektoriv u skladi system hariachoho vodopostachannia. Refrigeration Engineering and Technology, 56(1–2), 37–43. <https://doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1827>.

15. Skhemy obviazuvannia tverdopalyvnoho kotla URL: <https://centr-tepla.com.ua/ua/skhemy-obviazky-tverdopalyvnoho-kotla/> (data zvernennia: 16.11.2024).  
УДК 697.9:620.91

М. П. Кунденко, В. В. Старіков, О. Ю. Єгорова, Т. М. Пугачова, О. В. Кошельнік,  
Д. Ю. Білоус

## **КОМБІНОВАНІ СОНЯЧНО-ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ**

У статті досліджуються комбіновані сонячно-електричні системи теплопостачання, які інтегрують відновлювані та традиційні джерела енергії для забезпечення опалення і гарячого водопостачання. Запропоновано альтернативу існуючим світлопоглинальним покриттям у сонячних колекторах на основі низьковакуумних конденсатів алюмінію. Рекомендується покриття, що виготовляються з використанням вакуумних технологій, коли за рахунок примусового підвищення тиску на підкладку осаджується комбінований кластерний та молекулярний потоки речовини. Вибір у якості матеріалу для низьковакуумного покриття алюмінію додає переваг цій технології, бо алюміній має досить низьку температуру плавлення, а кероване утворення на поверхні плівки, що осаджується, оксидних фаз суттєво підвищує корозійну стійкість покриття. Розглянуто конструкції сонячних колекторів, їх принцип роботи та переваги використання селективних світлопоглинальних покриттів, які здатні підвищити ККД колекторів на 18–22 %. Запропоновано інноваційну систему інфрачервоного нагріву, що забезпечує підвищення ефективності теплопередачі, зниження енергоспоживання та стабільність роботи навіть при низькому рівні інсоляції. задачею запропонованої установки, є більш ефективно використовувати енергоносії. Це стає можливим за рахунок більш раціонального поєднання традиційної енергетики (живлення від мережі) і використання вторинних енергоресурсів; активної турбулізації маси теплоносія, що подається циркуляційним насосом у внутрішній об'єм кільцевої камери; регулювання температури нагріву; вирівнювання градієнтів температурного поля у внутрішньому об'ємі кільцевої камери; можливості регулювання продуктивності нагрівальної установки, підвищення технологічної надійності; уніфікації елементів і режимів нагріву; можливість живлення від мережі і нетрадиційних джерел. Проаналізовано застосування теплових акумуляторів та багатошарових систем, які дозволяють збільшити тривалість відбору гарячої води. Розглянуто можливості комбінованих схем з додатковими джерелами енергії, таки-

ми як електрокотли або котли на біопаливі, що знижує залежність від викопних енерго-ресурсів. Ці рішення сприяють підвищенню енергоефективності та сталого розвитку енергетики. Висновки підкреслюють потенціал інтеграції таких систем у сучасні енергетичні мережі, забезпечуючи екологічність, енергонезалежність і зниження експлуатаційних витрат.

**Ключові слова:** сонячний колектор, світлопоглинальне покриття, джерело, теплоносії, інфрачервоне випромінювання, геліосистема, опалення.

M. P. Kundenko, V. V. Starikov, O. Yu. Iegorova, T. M. Puhachova, O. V. Koshelnik,  
D. Yu. Bilous

### **COMBINED SOLAR-ELECTRIC HEAT SUPPLY SYSTEMS**

The article examines combined solar-electric heating systems that integrate renewable and traditional energy sources to provide heating and hot water. An alternative to existing light-absorbing coatings in solar collectors based on low-vacuum aluminum condensates is proposed. Coatings manufactured using vacuum technologies are recommended, when a combined cluster and molecular flow of matter is deposited on the substrate due to a forced increase in pressure. Choosing aluminum as a material for low-vacuum coating adds advantages to this technology, because aluminum has a fairly low melting point, and the controlled formation of oxide phases on the surface of the deposited film significantly increases the corrosion resistance of the coating. The designs of solar collectors, their principle of operation and the advantages of using selective light-absorbing coatings, which can increase the efficiency of collectors by 18–22 %. An innovative infrared heating system is proposed, which ensures increased heat transfer efficiency, reduced energy consumption, and stable operation even at a low level of insolation. the task of the proposed installation is to use energy carriers more efficiently. This becomes possible due to a more rational combination of traditional energy (supply from the network) and the use of secondary energy resources; active turbulation of the heat carrier mass supplied by the circulation pump into the internal volume of the annular chamber; regulation of the heating temperature; equalization of temperature field gradients in the inner volume of the ring chamber; possibilities of regulating the productivity of the heating installation, increasing technological reliability; unification of heating elements and modes; the possibility of power supply from the network and non-traditional sources. The use of heat accumulators and multilayer systems, which allow to increase the duration of hot water selection, have been analyzed. The possibilities of combined schemes with additional energy sources, such as electric boilers or biofuel boilers, which reduce dependence on fossil energy resources, are considered. These solutions contribute to increasing energy efficiency and sustainable development of the energy industry. The conclusions emphasize the potential of integrating such systems into modern energy networks, ensuring environmental friendliness, energy independence and reducing operating costs

**Keywords:** solar collector, light-absorbing coating, source, coolant, infrared radiation, solar system, heating.

Є. Д. Пономаренко, доцент, А. М. Миронов, к. техн. н., доцент,  
М. В. Ільченко, к. техн. н., доцент, К. О. Горбунов, к. техн. н., професор,  
С. М. Биканов, к. техн. н., доцент, Г. В. Пономаренко, к. техн. н., доцент,  
Л. В. Соловей, ст. викладач

## МОДИФІКОВАНИЙ ЧИСЛОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ КОМП'ЮТЕРНИХ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОМИСЛОВИХ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ

*Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків*

**Ключові слова:** математична модель, числові методи, гідравлічні системи, імітаційна модель, метод Нелдера-Міда, симплекс, трубопроводи.

У гідравлічних системах реальних хімічних виробництв переміщуються потоки рідин і газів, а також газо- та паро-рідинні суміші. До складу таких систем входять клапани, компресори, насоси та інше обладнання, яке може бути досить складним для коректної побудови інформаційно-імітаційних комп'ютерних моделей [1, 2].

Для простих гідравлічних систем трубопроводів приймаються ряд припущень:

- температура потоку постійна й однакова на всіх ділянках;
- в усій системі протікає однофазний потік рідини;
- гідравлічними опорами сполучних труб та перепадами тиску у них можна знехтувати [3];
- системи трубопроводів містять тільки звужуючі пристрої (вентилі, клапани) з постійними коефіцієнтами пропускної здатності [4];
- у системі немає зворотних потоків (рециклів), усі труби розташовуються на одному рівні;
- режим функціонування стаціонарний.

Однією з доволі розповсюджених та практично важливих задач [1-4] є проблема, пов'язана з необхідністю визначення витрат рідини через звужуючі пристрої та тисків у розгалуженнях на основі відомих значень тисків на вході та виході системи.

Падіння тиску рідини за наявності місцевого опору у потоці визначається за формулою Вейсбаха [5]:

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1)$$

де  $w = v/f$  – середня лінійна швидкість руху потоку, м/с,  $v$  – об'ємна витрата потоку, м<sup>3</sup>/с;  $f$  – площа поперечного перетину трубопроводу, м<sup>2</sup>;  $\rho$  – густина потоку, кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta$  – коефіцієнт місцевого опору.

Падіння тиску визначимо через об'ємну витрату потоку:

$$\Delta p = \frac{\zeta \cdot \rho}{2 \cdot f^2} v^2 \quad (2)$$

Звідки, об'ємна витрата дорівнює:

$$v = \frac{f \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\zeta \cdot \rho}} \sqrt{\Delta p}, \text{ або } v = k \sqrt{\Delta p},$$

де  $k$  – коефіцієнт пропускної здатності звужуючого пристрою,  $\text{м}^{3,5} / \text{кг}^{0,5}$ . Його величина розраховується наступним чином:

$$k = \frac{f \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\zeta \cdot \rho}}. \quad (3)$$

З урахуванням того, що знаки величин об'ємної витрати  $v$  та падіння тиску  $\Delta p$  повинні збігатися, рівняння набуває вигляду

$$v = k \cdot |\Delta p|^{0,5} \cdot \text{sign}(\Delta p), \quad (4)$$

де  $\text{sign}()$  – функція «знак»;

$$\text{sign}(\Delta p) = \pm 1.$$

Кількість рівнянь (4) дорівнює кількості звужувальних пристроїв. Ця система рівнянь доповнюється рівняннями матеріальних балансів у точках розгалуження [6]. Для кожного окремого вузла рівняння має вигляд:

$$\sum_{j=1}^K v_j = 0, \quad (5)$$

де  $K$  – кількість гілок трубопроводів, підключених до вузла.

У підсумку математична модель реального трубопроводу представлятиме собою систему нелінійних алгебраїчних рівнянь. Для вирішення такого типу систем нелінійних рівнянь найчастіше застосовують метод зведення системи нелінійних рівнянь до одного неявного нелінійного рівняння, яке розв'язують чисельним методом ітерацій з релаксацією [7]. Цей метод заснований на принципах простої ітерації. Пошук рішення відбувається шляхом побудови послідовних наближень. Метод простої ітерації у таких задачах не дає збіжності, рекурентна ж формула метода ітерацій з релаксацією для визначення початкового наближення для наступної ітерації містить коефіцієнт релаксації, який необхідно попередньо підбирати для досягнення збіжності [6]. Цей метод також є чутливим до початкового наближення. При побудові алгоритму необхідно передбачати можливість зациклення розрахунку. Усі ці недоліки метода вносять складнощі на етапі створення розрахункового алгоритму та проведенні імітаційного моделювання [8].

Метою даної роботи є розробка алгоритму, який буде позбавлений усіх названих недоліків, а саме: не вимагатиме підбору коефіцієнтів релаксації, є малочутливим до початкового наближення та гарантує високу збіжність методу.

Сутність методу полягає у тому, що система нелінійних алгебраїчних рівнянь трансформується у задачу оптимізації [9]. У якості цільової функції використовується сума відхилень початкових наближень у вхідних вентилях системи трубопроводів від їхніх розрахункових значень.

$$\sum_{i=1}^N |v_i^{in} - \hat{v}_i| \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $v_i^{in}$  – наближення значення витрати в  $i$ -му вхідному вентилі, м<sup>3</sup>/с;  $\hat{v}_i$  – розрахункове значення витрати в  $i$ -му вхідному вентилі, м<sup>3</sup>/с.

Цільова функція доповнюється системою рівнянь, яка отримується з системи (4) наступним шляхом. Вважаючи відомими значення витрат через вхідні вентиля, визначають усі інші невідомі витрати та тиски. У якості відомих значень витрат через вхідні вентиля приймають їх наближення. Потім з системи (5) отримують розрахункові значення витрат у вхідних вентилях, тобто ті, які були задані у якості наближень. Таким чином, усі раніше невідомі величини стають функціями від наближень. Далі за методом Нелдера-Міда [10, 11] здійснюють пошук значень  $v_i^{in}$ , які відповідатимуть умовам мінімуму цільової функції (6). За знайденими значеннями  $v_i^{in}$  визначають усі інші невідомі витрати та тиски.

Даний алгоритм доцільно більш детально розглянути на прикладі.

У якості прикладу розглянемо систему трубопроводів, представлену на рис. 1.

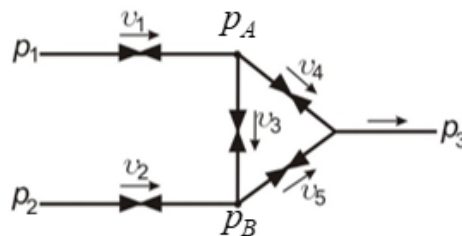


Рисунок 1 – Схема гідравлічної системи

Значення коефіцієнтів пропускної здатності звужуючих пристроїв для системи, що розглядається, прийняті (в м<sup>3,5</sup>/кг<sup>0,5</sup>):  $k_1 = 0,017$ ,  $k_2 = 0,015$ ,  $k_3 = 0,008$ ,  $k_4 = 0,013$ ,  $k_5 = 0,008$ . Значення тисків на входах і виходах системи прийняті (у Па):  $p_1 = 300000$ ,  $p_2 = 260000$ ,  $p_3 = 150000$ .

Математична модель даної гідравлічної системи в стаціонарному режимі містить п'ять рівнянь типу (4), відповідно до кількості звужуючих пристроїв, для визначення об'ємної витрати рідини через кожний вентиль:

$$v_1 = k_1 \cdot \sqrt{|p_1 - p_A|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_A); \quad (7)$$

$$v_2 = k_2 \cdot \sqrt{|p_A - p_2|} \cdot \text{sign}(p_A - p_2); \quad (8)$$

$$v_3 = k_3 \cdot \sqrt{|p_A - p_B|} \cdot \text{sign}(p_A - p_B); \quad (9)$$



$$v_4 = k_4 \cdot \sqrt{|p_A - p_3|} \cdot \text{sign}(p_A - p_3); \quad (10)$$

$$v_5 = k_5 \cdot \sqrt{|p_B - p_3|} \cdot \text{sign}(p_B - p_3). \quad (11)$$

Вона доповнюється двома рівняннями виду (5) відповідно до кількості вузлів розгалуження, на яких відбувається зміна тиску:

$$v_1 = v_3 + v_4; \quad (12)$$

$$v_5 = v_2 + v_3. \quad (13)$$

Величина відхилення розрахованих значень від заданих початкових наближень становить

$$\delta = |v_1 - \hat{v}_1| + |v_2 - \hat{v}_2|. \quad (14)$$

Мета полягає в отриманні результату, при якому відхилення було б менше заданої точності розрахунку. Тому сформулюємо це як задачу мінімізації функції

$$\delta = |v_1 - \hat{v}_1| + |v_2 - \hat{v}_2| \rightarrow \min. \quad (15)$$

Величини  $\hat{v}_1$ ,  $\hat{v}_2$  є функціями  $\hat{v}_1(v_1, v_2)$ ,  $\hat{v}_2(v_1, v_2)$  від наближень витрат  $v_1$ ,  $v_2$ . Тоді цільова функція набуває вигляду:

$$F(v_1, v_2) = |v_1 - \hat{v}_1(v_1, v_2)| + |v_2 - \hat{v}_2(v_1, v_2)| \rightarrow \min. \quad (16)$$

Для визначення параметрів  $\hat{v}_1(v_1, v_2)$ ,  $\hat{v}_2(v_1, v_2)$  необхідно спочатку визначити усі інші невідомі витрати та тиски, а саме тиски у точках розгалуження  $p_A$ ,  $p_B$  та об'ємні витрати рідини  $v_3$ ,  $v_4$ ,  $v_5$ , які б були залежними тільки від об'ємних витрат  $v_1$ ,  $v_2$ .

З системи рівнянь (7)–(11) отримаємо:

$$p_A(v_1) = p_1 - \left(\frac{v_1}{k_1}\right)^2 \cdot \text{sign}(v_1); \quad (17)$$

$$p_B(v_2) = p_2 - \left(\frac{v_2}{k_2}\right)^2 \cdot \text{sign}(v_2); \quad (18)$$

$$v_3(v_1, v_2) = k_3 \cdot \sqrt{|p_A(v_1) - p_B(v_2)|} \cdot \text{sign}(p_A(v_1) - p_B(v_2)); \quad (19)$$

$$v_4(v_1) = k_4 \cdot \sqrt{|p_A(v_1) - p_3|} \cdot \text{sign}(p_A(v_1) - p_3); \quad (20)$$

$$v_5(v_2) = k_5 \cdot \sqrt{|p_B(v_2) - p_3|} \cdot \text{sign}(p_B(v_2) - p_3). \quad (21)$$

З рівнянь (12)–(13) виразимо  $\hat{v}_1(v_1, v_2)$ ,  $\hat{v}_2(v_1, v_2)$  через їхні наближення.

$$\hat{v}_1(v_1, v_2) = v_3(v_1, v_2) + v_4(v_1) \quad (22)$$

$$\hat{v}_2(v_1, v_2) = -v_3(v_1, v_2) + v_5(v_2) \quad (23)$$

Для оптимізації функцій декількох змінних  $F(\bar{x})$  використовуються різні числові методи багатовимірної оптимізації. Розв'язання оптимізаційних задач являє собою ітераційний процес переміщення по гіперповерхні цільової функції до точки оптимуму.

З них був обраний метод деформованого багатогранника Нелдера-Міда (симплексного методу Нелдера-Міда). Серед його переваг можна відзначити відсутність потреби у визначенні похідних цільової функції, простоту в реалізації та гарну збіжність.

Нелдер і Мід запропонували [10] метод визначення мінімуму функції кількох змінних із використанням  $n+1$  вершин деформованого симплексу в  $n$ -вимірному просторі. Кожна вершина відповідає вектору  $\bar{x}$  значень цільової функції. Це метод можна використовувати і для задач безумовної оптимізації [12].

Початковий симплекс є регулярним, це правильний багатогранник, утворений  $(n+1)$ -ю рівновіддаленими одна від одної вершинами. Для випадку двох змінних  $n=2$  симплекс являє собою рівносторонній трикутник на площині.

У процесі оптимізації відбувається деформація симплекса, тому метод і називають методом деформованого багатогранника. При цьому зміни геометричного положення стосуються тільки гіршої з точок, тобто точки з найбільшим значенням функції. Процес послідовної заміни точки з максимальним значенням  $F(\bar{x})$  на точки з меншим значенням функції продовжуватиметься доти, поки не буде знайдено мінімум  $F(\bar{x})$ .

Алгоритм пошуку мінімуму функції за методом Нелдера-Міда складається з наступних кроків [10, 13].

1. Виконують операцію сортування за зростанням значення функції; нумерують вершини в за результатом сортування, починаючи з меншого значення функції.

2. Вершина симплексу з найбільшим (найгіршим) значенням функції  $\bar{x}_{n+1}^{(k)}$  дзеркально відображається через центр тяжіння решти вершин у нову точку  $\bar{u}^{(k)}$  – вершину нового багатогранника.

3. У новій точці  $\bar{u}^{(k)}$  визначають значення функції  $F(\bar{u}^{(k)})$  та порівнюють із значеннями функцій у інших вершинах багатогранника [14].

4. Оцінюють нову вершину. Якщо у новій точці  $\bar{u}^{(k)}$  значення функції менше, ніж у точці  $\bar{x}_{n+1}^{(k)}$ , то у ситуації:

а) коли значення функції у точці  $\bar{u}^{(k)}$  лежить між значеннями функцій у першій та передостанній точках симплекса, вершину  $\bar{x}_{n+1}^{(k)}$  замінюють на  $\bar{u}^{(k)}$ . Відображення замінює оригінал, формується новий симплекс (деформований) для нової  $k+1$ -ої ітерації. Переходять до пункту 6.

б) коли значення функції у точці  $\bar{u}^{(k)}$  менше за значення у першій точці симплекса, то вершина, отримана в результаті віддзеркалення, є кращою з вершин. Симплекс розтягують в напрямі відображення, визначають координати нової точки  $\bar{v}^{(k)}$ , вершина  $\bar{x}_{n+1}^{(k)}$  переноситься в точку  $\bar{v}^{(k)}$ . Переходять до пункту 6.

в) коли значення функції в точці  $\bar{u}^{(k)}$  більше за значення у передостанній точці симплекса, виконують стиснення симплексу. Ця процедура застосовується, коли за відображенням отримали точку, яка гірша за гарну передостанню точку, або така сама (є вірогідність, що отримають усередині симплексу кращу точку). Визначають точку  $\bar{w}^{(k)}$ .

5. Обчислюється значення функції в точці  $\bar{w}^{(k)}$ .

Якщо  $F(\bar{w}^{(k)}) < \min \{ F(\bar{x}_{n+1}^{(k)}), F(\bar{u}^{(k)}) \}$ , то вершина  $\bar{x}_{n+1}^{(k)}$  замінюється на  $\bar{w}^{(k)}$ .

У іншому випадку здійснюється редукція [15] (зменшення розміру симплексу шляхом наближення усіх його вершин до вершини  $\bar{x}_1^{(k)}$  з метою звузити зону пошуку навколо найкращої точки).

6. Після завершення  $k$ -ї ітерації проводиться перевірка виконання критерія

$$\left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=2}^{n+1} \left[ F(\bar{x}_i^{(k)}) - F(\bar{x}_1^{(k)}) \right]^2 \right\}^{1/2} \leq \varepsilon, \quad (24)$$

де  $\varepsilon$  – заздалегідь задана точність розрахунку.

Якщо нерівність (24) виконується, то на цьому пошук мінімуму функції закінчується. У якості точки мінімуму приймається точка  $\bar{x}_1^{(k)}$ .

Якщо критерій не виконується, то з новим побудованим симплексом переходять до нової ітерації, починаючи її з кроку номер 1.

При вирішенні задачі мінімізації (16)–(23) методом Нелдера-Міда витрати  $v_1, v_2$  становлять точку в факторному просторі  $\bar{x}$ . Початковий регулярний симплекс для двох змінних це трикутник з вершинами  $x_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 3 \\ 10 \end{pmatrix}$ ,  $x_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,966 \\ 10,259 \end{pmatrix}$ ,  $x_3^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,259 \\ 10,966 \end{pmatrix}$ . Верхній індекс у дужках означає номер ітерації. Координати кожної вершини симплекса (трикутника) – витрати  $v_1, v_2$ , які змінюють значення в процесі пошуку.

Вершини симплекса нумерують за зростанням значень функцій (рис. 2).

На першій ітерації вершина симплексу з найбільшим (найгіршим) значенням функції  $\bar{x}_3^{(1)}$  проектується через центр тяжіння вершин  $\bar{x}_1^{(1)}$  та  $\bar{x}_2^{(1)}$  на належну відстань в нову точку  $\bar{u}^{(1)}$  – вершину нового багатогранника. Відбувається процес відображення (відбиття) вершини  $\bar{x}_3^{(1)}$ .

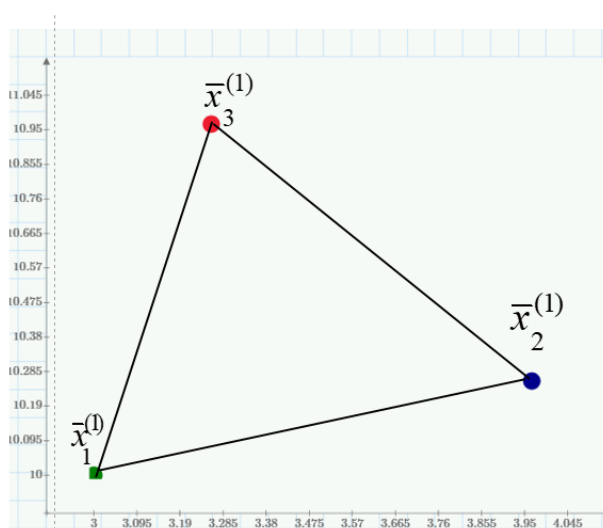


Рисунок 2 – Початковий регулярний симплекс

У відображеній точці  $\bar{u}^{(1)}$  визначають значення функції  $F(\bar{u}^{(1)})$ . Порівняння зі значеннями функцій у інших вершинах багатогранника показало, що визначена точка  $\bar{u}^{(1)}$  є найкращою з усіх та має найменше значення функції  $F(\bar{u}^{(1)})$ . Тому відбувається розтягнення – симплекс розтягують у напрямку відображення і визначають координати нової точки, до якої переноситься вершина  $\bar{x}_3^{(1)}$ . Визначається нове значення функції. Так сформувався новий симплекс для другої ітерації (рис. 3).

На початку кожної нової ітерації вершини нумерують за зростанням функцій.

В таблиці 1 показано, що на перших трьох ітераціях процесу оптимізації відбувалося розтягнення симплексу, а на четвертій ітерації значення функції у відображеній точці  $u^{(4)}$  виявилось більшим, ніж у другій точці  $x_2^{(4)}$ . Усе це призвело до стиснення симплекса (рис. 4).

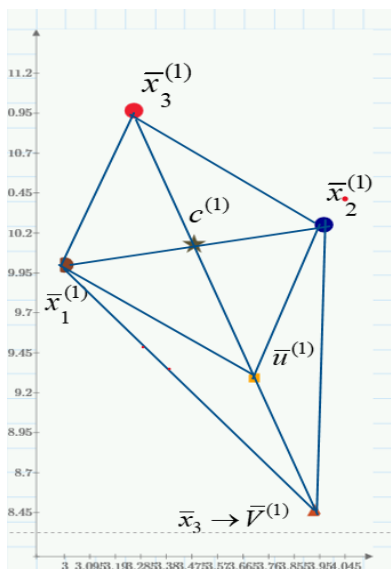


Рисунок 3 – Перша ітерація. Розтягнення симплекса

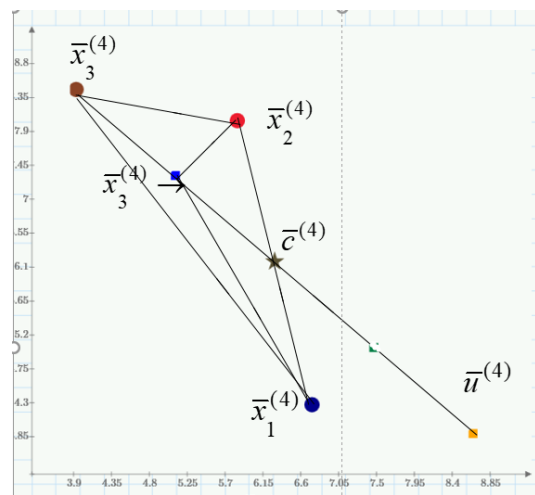


Рисунок 4 – Четверта ітерація. Стиснення симплекса

На п'ятій ітерації виконалось співвідношення  $F(\bar{x}_1^{(5)}) \leq F(\bar{u}^{(5)}) < F(\bar{x}_2^{(5)})$ , через це вершина  $\bar{x}_3^{(5)}$  замінилась на відображення  $\bar{u}^{(5)}$  (рис. 5).

Результати обчислень на перших шести, а також проміжній та кінцевій ітераціях наведені у таблиці 1.

Початкова траєкторія руху до оптимуму функції показана на рис. 6, на першій ітерації відмічені симплекс, центр тяжіння і точка відбиття.

У результаті розв'язання задачі мінімізації (16)–(23) методом Нелдера-Міда з точністю  $\varepsilon = 10^{-4}$  отримані значення об'ємних витрат рідини через звужуючі пристрої  $v_1 = 4,151$ ,  $v_2 = 2,15$ . Далі з рівнянь (17)–(21) визначені витрати  $v_3 = 0,243$ ,  $v_4 = 3,908$ ,  $v_5 = 2,393$  та тиски у точках розгалуження  $p_A = 2,404 \cdot 10^5$ ,  $p_B = 2,395 \cdot 10^5$ .

У процесі моделювання проведено розрахункові дослідження щодо впливу вхідного тиску  $p_1$  у діапазоні 300 000÷500 000 Па з кроком 50 000 Па на зміну параметрів системи. Результати приведені на рис. 7 та рис. 8.

Таблиця 1 – Результати ітераційних обчислень

Початковий симплекс			Сортування вершин симплексу				Номер ітерації
$x_1^{(l)}$	$x_2^{(l)}$	$x_3^{(l)}$	Центр тяжіння вершин $x_1, x_2$	Відбиття	Перенесення вершини в нову точку		
$x_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 3 \\ 10 \end{pmatrix}$ F1=26.88	$x_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,966 \\ 10,259 \end{pmatrix}$ F2=25,87	$x_3^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,259 \\ 10,966 \end{pmatrix}$ F3=29.027					
$x_1^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,966 \\ 10,259 \end{pmatrix}$ F1=25,87	$x_2^{(1)} = \begin{pmatrix} 3 \\ 10 \end{pmatrix}$ F2=26.88	$x_3^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,259 \\ 10,966 \end{pmatrix}$ F3=29.027	$c^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,483 \\ 10,129 \end{pmatrix}$	$u^{(1)} = \begin{pmatrix} 3,707 \\ 9,293 \end{pmatrix}$ Fu = 23,747	$x_3^{(1)} \rightarrow \begin{pmatrix} 3,931 \\ 8,456 \end{pmatrix}$ F3=21,038	Розтяг. симпл.	1
$x_1^{(2)} = \begin{pmatrix} 3,931 \\ 8,456 \end{pmatrix}$ F1=21.038	$x_2^{(2)} = \begin{pmatrix} 3,966 \\ 10,259 \end{pmatrix}$ F2=25,87	$x_3^{(2)} = \begin{pmatrix} 3 \\ 10 \end{pmatrix}$ F3=26.88	$c^{(2)} = \begin{pmatrix} 3,949 \\ 9,358 \end{pmatrix}$	$u^{(2)} = \begin{pmatrix} 4,897 \\ 8,715 \end{pmatrix}$ Fu = 19,684	$x_3^{(2)} \rightarrow \begin{pmatrix} 5,846 \\ 8,043 \end{pmatrix}$ F3=15,291	Розтяг. симпл.	2
$x_1^{(3)} = \begin{pmatrix} 5,846 \\ 8,043 \end{pmatrix}$ F1=15,291	$x_2^{(3)} = \begin{pmatrix} 3,931 \\ 8,456 \end{pmatrix}$ F2=21.36	$x_3^{(3)} = \begin{pmatrix} 3,966 \\ 10,259 \end{pmatrix}$ F3=25,87	$c^{(3)} = \begin{pmatrix} 4,889 \\ 8,265 \end{pmatrix}$	$u^{(3)} = \begin{pmatrix} 5,811 \\ 6,27 \end{pmatrix}$ Fu = 11,75	$x_3^{(3)} \rightarrow \begin{pmatrix} 6,734 \\ 4,276 \end{pmatrix}$ F3=10,733	Розтяг. симпл.	3
$x_1^{(4)} = \begin{pmatrix} 6,734 \\ 4,276 \end{pmatrix}$ F1=10,733	$x_2^{(4)} = \begin{pmatrix} 5,846 \\ 8,043 \end{pmatrix}$ F2=15,291	$x_3^{(4)} = \begin{pmatrix} 3,931 \\ 8,456 \end{pmatrix}$ F3=21.32	$c^{(4)} = \begin{pmatrix} 6,29 \\ 6,174 \end{pmatrix}$	$u^{(4)} = \begin{pmatrix} 8,648 \\ 3,893 \end{pmatrix}$ Fu = 16,923	$x_3^{(4)} \rightarrow \begin{pmatrix} 7,469 \\ 5,033 \end{pmatrix}$ 15.607	Стисн. симпл.	4
$x_1^{(5)} = \begin{pmatrix} 6,734 \\ 4,276 \end{pmatrix}$ F1=10,733	$x_2^{(5)} = \begin{pmatrix} 5,846 \\ 8,043 \end{pmatrix}$ F2=15,291	$x_3^{(5)} = \begin{pmatrix} 7,469 \\ 5,033 \end{pmatrix}$ 15.607	$c^{(5)} = \begin{pmatrix} 6,29 \\ 6,174 \end{pmatrix}$	$u^{(5)} = \begin{pmatrix} 5,11 \\ 7,315 \end{pmatrix}$ Fu = 15,168	$x_3^{(5)} \rightarrow \begin{pmatrix} 5,11 \\ 7,315 \end{pmatrix}$ F = 15,168	Відобр. симпл.	5
$x_1^{(6)} = \begin{pmatrix} 6,734 \\ 4,276 \end{pmatrix}$ F1=10,733	$x_2^{(6)} = \begin{pmatrix} 5,645 \\ 7,784 \end{pmatrix}$ F1=15,069	$x_3^{(6)} = \begin{pmatrix} 5,11 \\ 7,315 \end{pmatrix}$ F = 15,168	$c^{(6)} = \begin{pmatrix} 5,922 \\ 5,796 \end{pmatrix}$	$u^{(6)} = \begin{pmatrix} 5,998 \\ 3,519 \end{pmatrix}$ Fu = 5,556	$x_3^{(6)} \rightarrow \begin{pmatrix} 5,998 \\ 3,519 \end{pmatrix}$ F = 5,556	Відобр. симпл.	6
...	...	...	...	...	...		
$x_1^{(40)} = \begin{pmatrix} 4,147 \\ 2,146 \end{pmatrix}$ F1=0,012	$x_2^{(40)} = \begin{pmatrix} 4,155 \\ 2,159 \end{pmatrix}$ F1=0,019	$x_3^{(40)} = \begin{pmatrix} 4,157 \\ 2,155 \end{pmatrix}$ F3=0,021	$c^{(40)} = \begin{pmatrix} 4,151 \\ 2,152 \end{pmatrix}$	$u^{(40)} = \begin{pmatrix} 4,145 \\ 2,149 \end{pmatrix}$ Fu = 0,047	$x_3^{(40)} \rightarrow \begin{pmatrix} 4,145 \\ 2,149 \end{pmatrix}$ F = 0,047	Відобр. симпл.	40
...	...	...	...	...	...		
$x_1^{(52)} = \begin{pmatrix} 4,151 \\ 2,15 \end{pmatrix}$ F = 1,8 · 10 <sup>-4</sup>	$x_2^{(52)} = \begin{pmatrix} 4,151 \\ 2,15 \end{pmatrix}$ F = 2,1 · 10 <sup>-4</sup>	$x_3^{(52)} = \begin{pmatrix} 4,151 \\ 2,15 \end{pmatrix}$ F = 2,6 · 10 <sup>-4</sup>					52

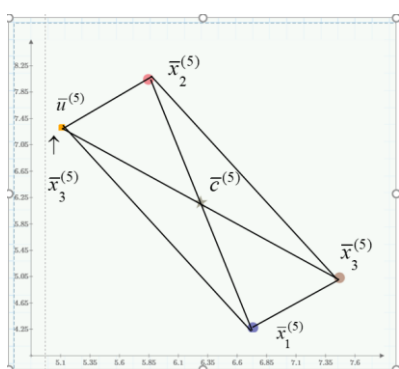


Рисунок 5 – Подальші ітерації Відображення симплекса

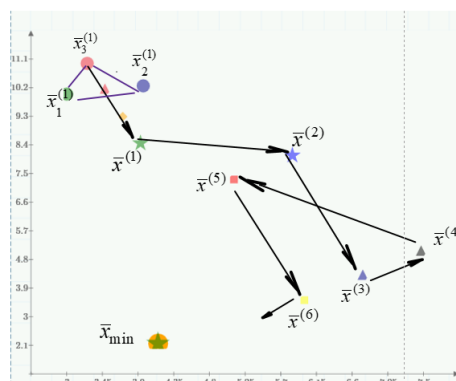


Рисунок 6 – Траєкторія руху до точки мінімуму на перших ітераціях

У процесі моделювання проведено розрахункові дослідження щодо впливу вхідного тиску  $p_1$  у діапазоні 300 000÷500 000 Па з кроком 50 000 Па на зміну параметрів системи. Результати приведені на рис. 7 та рис. 8.

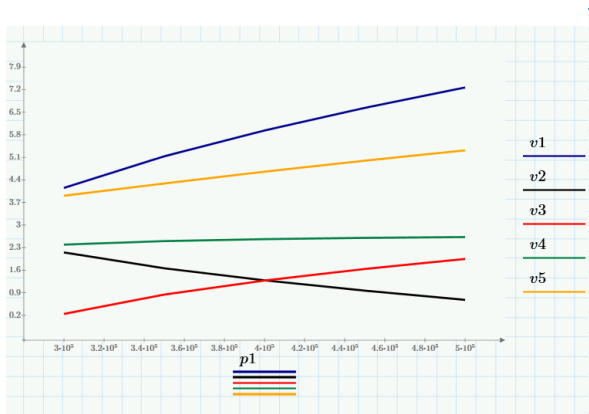


Рисунок 7 – Залежність об’ємних витрат через вентиля від вхідного тиску

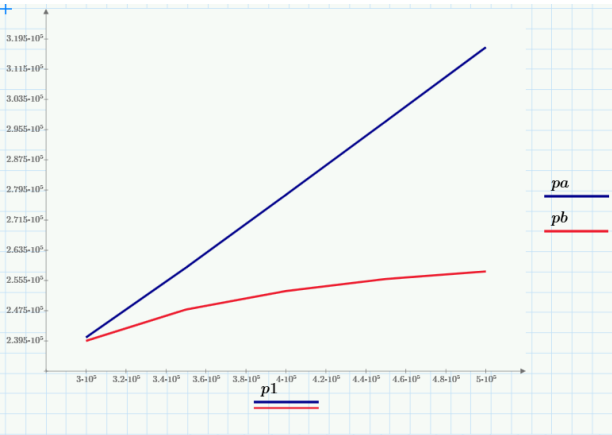


Рисунок 8 – Залежність тисків в точках розгалуження трубопроводів від вхідного тиску

Таким чином, у роботі запропонована й обґрунтована можливість та доцільність використання методу розрахунку параметрів гідравлічних систем трубопроводів за допомогою методу, який дозволяє сформулювати розрахункову математичну модель у вигляді оптимізаційної задачі. Показана ефективність використання для пошуку мінімуму цільової функції безградієнтного метода Нелдера-Міда. Запропонований підхід спрощує пошук рішення порівняно з традиційним підходом, заснованим на числовому розв’язанні системи нелінійних рівнянь і дозволяє прискорити імітаційне моделювання.

### Bibliography

1. Isermann, R. (2006). Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation. 2nd ed. Berlin: Springer.
2. Rao, S.S. (2009). Engineering Optimization: Theory and Practice. 4th ed. New York: Wiley.
3. Zhu, H., Liu, X. and Wang, S. (2022). Optimization Techniques in Hydraulic Systems: Applications of the Nelder-Mead Method. Journal of Fluid Engineering, 144(7), pp. 1–18.
4. Press, W.H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. (2007). Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press.
5. Avriel, M. (2003). Nonlinear Programming: Analysis and Methods. New York: Dover Publications.
6. Dennis, J.E. and Schnabel, R.B. (1996). Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations. Philadelphia: SIAM.
7. Gill, P.E., Murray, W. and Wright, M.H. (1981). Practical Optimization. London: Academic Press.
8. Rios, L. and Sahinidis, N.V. (2013). Derivative-Free Optimization: A Review of Algorithms and Comparison with Nelder-Mead Approach. Journal of Global Optimization, 56(3), pp. 457–479.

9. Cerf, M. (2023). 2.4 Nelder-Mead method. In: Optimization Techniques I: Continuous Optimization. Les Ulis: EDP Sciences, pp. 131–140. [Online]. Available at: <https://doi.org/10.1051/978-2-7598-3162-3.c014>.

10. Nelder, J.A. and Mead, R. (1965). A Simplex Method for Function Minimization. Computer Journal, 7(4), pp. 308–313.

11. Pasini, F., Lovison, A. and Poloni, C. (2018). Constrained Globalized Nelder-Mead Method for Multidimensional Optimization. Computational Mechanics, 62(3), pp. 433–445.

12. Zhang, J. and Liu, Y. (2015). Simulated Hydraulic Flow Optimization Using Nelder-Mead in Engineering Design. Computational Fluid Dynamics Journal, 63(4), pp. 129–144.

13. Fletcher, R. (1987). Practical Methods of Optimization. 2nd ed. Chichester: Wiley.

14. Siddiqui, M., Malik, F. and Anwar, Z. (2020). Enhanced Nelder-Mead Algorithm for Flow Dynamics in Hydraulic Networks. Applied Mathematical Modelling, 77(2), pp. 292–310.

15. Luersen, M.A. and Le Riche, R. (2004). Globalized Nelder-Mead Method for Engineering Optimization. Computers and Structures, 82(1), pp. 1–14. [Online]. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2004.03.072>.

УДК 66.06:515.1

Є. Д. Пономаренко, доцент, А. М. Миронов, к. техн. н., доцент,  
М. В. Ільченко, к. техн. н., доцент, К. О. Горбунов, к. техн. н., професор,  
С. М. Биканов, к. техн. н., доцент, Г. В. Пономаренко, к. техн. н., доцент,  
Л. В. Соловей, ст. викладач

### **МОДИФІКОВАНИЙ ЧИСЛОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ РОЗРОБКИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ КОМПЛЕКСІВ КОМП'ЮТЕРНИХ ІМІТАЦІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОМИСЛОВИХ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ**

У статті представлено модифікований числовий метод визначення параметрів гідравлічних систем, що знаходять застосування при створенні математичних моделей та інформаційно-імітаційних комплексів для моделювання хімічних виробництв. Описано, як у таких системах рідини, газу або їхні суміші переміщуються через трубопроводи з клапанами, компресорами та іншими елементами, що потребують точного моделювання для забезпечення стабільності та продуктивності. Традиційні підходи до числового розв'язання систем нелінійних рівнянь часто стикаються з такими проблемами, як чутливість до початкових наближень та необхідність підбору коефіцієнтів релаксації, що ускладнює процес імітаційного моделювання.

Запропонований метод базується на перетворенні нелінійної системи рівнянь на задачу оптимізації. Для мінімізації відхилення між початковими наближеннями та розрахунковими параметрами використовується метод Нелдера-Міда, який не вимагає градієнтів та використовує просту геометричну трансформацію симплекса. Завдяки цьому підходу вдалося вирішити проблеми, властиві методам ітерацій із релаксацією, забезпечуючи високу точність, стабільну збіжність і швидкість обчислень. Перевагою методу є його універсальність та можливість адаптації до складних систем.

Для перевірки ефективності методу розглянуто приклад реальної гідравлічної системи з кількома звужувальними пристроями. Математична модель описує тиски та витрати в системі через систему рівнянь, яка включає матеріальні баланси у вузлах розгалужень. Проведено числові експерименти для аналізу впливу вхідного тиску на параметри системи, що підтвердило коректність та високу точність запропонованого алгоритму. Виявлено, що метод дозволяє точно моделювати параметри системи в стаціонарних режимах і визначати критичні точки оптимізації.

Таким чином, запропонований підхід має потенціал для застосування в проектуванні та експлуатації промислових хімічних установок. Це рішення значно спрощує процеси побудови математичних моделей, підвищує їхню надійність та прискорює імітаційне моделювання, сприяючи підвищенню ефективності управління технологічними процесами.

**Ключові слова:** математична модель, числові методи, гідравлічні системи, імітаційна модель, метод Нелдера-Міда, симплекс, трубопроводи.

Ye. D. Ponomarenko, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko, K. O. Gorbunov, S. M. Bykanov,  
G. V. Ponomarenko, L. V. Solovei

## **A MODIFIED NUMERICAL METHOD OF DETERMINING HYDRAULIC SYSTEM PARAMETERS FOR THE DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS AND INFORMATION COMPLEXES OF COMPUTER SIMULATION MODELS FOR INDUSTRIAL CHEMICAL PRODUCTION**

The paper introduces a modified numerical method for determining the parameters of hydraulic systems used in mathematical modeling and simulation-based computer systems for industrial chemical production. It explores the dynamics of fluids, gases, and their mixtures as they traverse pipelines equipped with valves, compressors, and other complex components. Traditional methods for solving nonlinear equation systems often face limitations, including sensitivity to initial approximations and the need for relaxation coefficient adjustments, which complicate simulation processes.

The proposed method converts nonlinear equations into an optimization problem, using the Nelder-Mead algorithm to minimize deviations between initial estimates and computed parameters. This derivative-free approach employs a simplex geometric transformation, overcoming issues associated with iterative methods and delivering high accuracy, stable convergence, and computational efficiency. Its adaptability makes it suitable for handling intricate hydraulic systems.

To validate the method, a practical example involving a pipeline system with multiple restricting devices is analyzed. The mathematical model includes equations for pressures and flow rates, supplemented by material balance constraints at branching points. Numerical experiments evaluate how input pressure influences system parameters, demonstrating the model's robustness and precision. The results confirm that the method accurately simulates system parameters under steady-state conditions and identifies critical optimization points.

This innovative approach offers significant advantages for designing and managing industrial chemical facilities. By simplifying model construction, enhancing reliability, and accelerating simulation processes, the method provides a powerful tool for optimizing the operation and control of complex technological systems.

**Keywords:** mathematical model, numerical methods, hydraulic systems, simulation model, Nelder-Mead method, simplex, pipelines.



О. Б. Аніпко<sup>1</sup>, д. техн. н., професор, І. Ю. Бірюков<sup>2</sup>, д. техн. н., професор,  
Д. С. Баулін<sup>2</sup>, к. техн. н., с. н. с., О. О. Муленко<sup>2</sup>, викладач кафедри

## РАЦІОНАЛЬНІ ТЕРМІНИ ЗБЕРІГАННЯ БОЄПРИПАСІВ ЗА УМОВИ МІНІМІЗАЦІЇ ВПЛИВУ НА АВТОМАТИЧНУ ЗБРОЮ ТА ЇЇ БАЛІСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

<sup>1</sup>Харківський Національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

<sup>2</sup>Національна академія Національної гвардії України, Харків

**Ключові слова:** стрілецька зброя, ствол, раціональні терміни зберігання боєприпасів, нітроцелюлозні порохи, балістичні характеристики зброї, максимальний тиск, початкова швидкість кулі, експериментальні дослідження, інтенсивність вичерпання живучості.

**Постановка проблеми.** Не зважаючи на частковий перехід збройних формувань України на озброєння країн НАТО і надання боєприпасів до даних зразків, актуальною є проблема виготовлення та накопичення необхідної кількості боєприпасів до стрілецької зброї.

Серед великої розмаїтості вимог, пропонованих до сучасної стрілецької зброї, можна виділити безвідмовну роботу зразка озброєння, що досягається забезпеченням необхідної живучості деталей і механізмів автоматичної зброї. Відомо [1–3], що всі піроксилінові порохи за природою компонентів є системами хімічно нестійкими, тому в процесі експлуатації зазнають фізичні та хімічні перетворення. Однією з найважливіших проблем у комплексній оцінці властивостей порохів і зарядів є прогнозування таких змін на тривалих відрізках часу і встановлення (на цій основі) гарантійних термінів їх експлуатаційної придатності, а також призначення видів і термінів чергових перевипробувань.

Динамічний характер зусиль і напруг, що діють на деталі автоматичної зброї, утрудняє забезпечення їхньої міцності і є однією з головних причин порівняно низької живучості. У силу цієї й інших причин на розрахунковому режимі інтенсивності зниження живучості (знос) живучість деталей автоматичної зброї не перевищує декількох десятків тисяч пострілів. Особливе значення має забезпечення достатньої живучості ствола, що грає вирішальну роль у загальній живучості зброї [4, 5]. При цьому живучість зброї оцінюється по ступеню довговічності, тобто по можливості об'єкта зберігати працездатність до настання граничного стану при встановленій системі технічного обслуговування та ремонту. У зброї, як правило, довговічність оцінюється ресурсом ствола. Критеріями граничного стану є: падіння початкової швидкості снаряда на 5 % (іноді на 10 %); збільшенню технічного розсіювання куль в 2,5 рази; втрата стійкості (влученню 50 % куль у мішень плашмя).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Живучість зброї вимірюється кількістю зроблених пострілів до суттєвої зміни балістичних якостей зброї, які визначаються за погіршенням купчастості бою, виникненню випадків зриву куль з нарізів, що призводять до неправильного польоту кулі. При загальній живучості стрілецького озброєння від 20000 до 100000 пострілів живучість стволів складає всього від 4000 до 25000 пострілів [6].

Основними причинами зношування каналу ствола є стирання його внутрішніх поверхонь у результаті:

- тиску між виступами оболонки кулі й полями нарізів, що виникає внаслідок обертового руху кулі;
- тертя при русі кулі;
- зусилля, що виникає при врзанні полів нарізів в оболонку кулі;
- ефекту розпалу ствола.

А за умови використання боеприпасів тривалого терміну зберігання підвищується тиск до 1,2–1,23 рази та температура в каналі ствола при пострілі [5, 7].

З ростом зношування погіршуються балістичні характеристики, як наслідок – спостерігається зниження початкової швидкості кулі, збільшується розсіювання, які приводять відповідно до збільшення кількості боеприпасів необхідних на виконання вогневого завдання, а також до зменшення дальності гарантованого пробиття перешкоди (або зовсім не пробиття), що вже є втратою однієї з властивостей зброї [8].

Дослідження й досвід експлуатації ствольної зброї показують, що на зношування каналу ствола впливає ряд факторів: калібр ствола і його балістичні показники, конструкція й матеріал ствола та стан порохового заряду, режим ведення вогню.

На процес зношування поверхні каналу ствола впливає велика кількість чинників: конструктивних, технологічних, балістичних, експлуатаційних. З ростом зношування погіршуються балістичні якості ствола і, як наслідок, спостерігається зниження початкової швидкості кулі, збільшується розсіювання, що призводить до збільшення кількості боеприпасів, необхідних для виконання вогневої задачі.

Розпал каналу ствола являє собою складний процес, що не вивчений ще в повному обсязі [4, 9]. Спеціальні дослідження і досвід експлуатації різноманітних видів ствольних систем показують, що на розпал каналу ствола впливає ряд факторів: калібр ствола і його балістичні показники, конструкція і матеріал ствола, стан порохового заряду. Підвищення швидкості кулі і тиску порохових газів підсилюють розпал. Для пояснення механізму розпалу низкою дослідників запропоновано кілька гіпотез [2, 10]:

- гіпотеза термічної дії порохових газів (дана гіпотеза виходить з того, що розпал каналу ствола обумовлений, головним чином, тепловим впливом порохових газів на матеріал ствола);

- гіпотеза механічної дії потоку порохових газів (у цій гіпотезі визнається, що вирішальним фактором розпалу є механічна газодинамічна дія порохових газів, причому суттєве значення надається вихрувату руху газів. Вихроутворенню сприяє зміна перерізу каналу при переході від камери до нарізної частини і наявність нарізів);

- гіпотеза хімічної дії порохових газів (у даній гіпотезі визнається, що вирішальним фактором розпалу є зміна механічних властивостей металу за рахунок хімічного впливу порохових газів на метал).

При цьому у всіх гіпотезах зазначаються тиск порохових газів і швидкість горіння порохового заряду, які безпосередньо залежать від стану порохового заряду.

З досвіду зберігання боеприпасів [11] можна судити, що їх чутливість до зовнішніх впливів з часом підвищується, що пов'язано зі зміною властивостей порохових зарядів, якими споряджені боеприпаси. Незважаючи на лакофарбові покриття поверхонь корпусів, що стикаються з зарядом, з плином часу можуть відбуватися взаємодія порохів з матеріалом корпусу боеприпасів і утворення більш чутливих у порівнянні з вихідним зарядом з'єднань, що підвищує небезпеку подальшого зберігання боеприпасів.

Визначено, що зміна фізико-хімічних властивостей порохових зарядів у процесі

зберігання суттєво впливає на показники параметрів внутрішньої балістики під час пострілу [12].

Балістичні якості піроксилінових порохів визначаються сукупністю ряду властивостей: працездатністю, формою порохових елементів, швидкістю горіння, й оцінюються величинами початкової швидкості кулі, максимального тиску порохових газів і середнього відхилення початкової швидкості під час стрільби з тієї чи іншої зброї [1, 2, 5, 13].

Здатність порохів забезпечувати сталість цих величин у процесі тривалого зберігання і при стрільбі в різних умовах – це балістична стабільність порохів. Вона тісно пов'язана з їх фізичною та хімічною стійкістю. Порохи, що відрізняються високою фізичною або хімічною стійкістю, будуть і балістично стабільними [1, 4, 5, 14].

Балістична стабільність відіграє вирішальну роль при встановленні терміну експлуатації порохів. Проблема стабілізації виникає в кожному випадку з моменту розробки та прийняття на озброєння порохів. Актуальність цього питання впливає як з вимоги забезпечення безпеки в поводженні з порохом, так і з вимог економічного характеру і забезпечення надійності функціонування зарядів боєприпасів.

З огляду на вищеподане треба особливо підкреслити, що, якщо до недавнього часу актуальною була проблема застосування боєприпасів тривалих термінів зберігання, то зараз в сучасних умовах на передній план виходить задача визначення раціональних термінів зберігання боєприпасів, які забезпечують збереження озброєння та балістичні характеристики пострілу. Це обумовлено наступним.

Тим, що аналіз інтенсивності вичерпання запасів боєприпасів, в сучасному збройному конфлікті високої інтенсивності, дуже висока. Об'єми витрачених боєприпасів за добу суттєво перевищують раніше прогнозовані значення. З іншого боку інтенсивність виробництва майже самих розвинутих країн світу не може забезпечити швидке поповнення витрат боєприпасів. Крім того останнім часом спостерігається тенденція, щодо дефіциту сировини для виготовлення нітроцелюлозних порохів, це в свою чергу може призводити як до підвищення витрат на виготовлення боєприпасів, так і до припинення виробництва. Тому для того щоб уникнути означених загроз доцільним залишається накопичення стратегічного запасу практично всієї номенклатури боєприпасів до ствольних систем, але в цьому сенсі виникає завдання визначення раціональних термінів зберігання які б забезпечили:

1. Накопичення необхідної кількості запасу
2. Гарантоване виконання вогневої задачі відповідно до зразка
3. Не пошкодження матеріальної частини вище меж передбачених розрахунковим режимом експлуатації, або інтенсивності вичерпання живучості.

Таким чином така задача виглядає у формальній постановці як зворотня, щодо задачі визначення зміни балістичних характеристик та впливу на матеріальну частину стрілецької зброї за умови використання боєприпасів тривалих термінів зберігання.

Доведено, що тривале зберігання боєприпасів приводить до зміни фізико-хімічних характеристик порохів [5]. Тому ресурс ствола визначається зміною показників внутрішньої балістики, обумовлених геронтологічними змінами порохового заряду.

На підставі даних проведених експериментів [10, 15], при постійному використанні таких боєприпасів через зростання максимального тиску можлива зміна об'єму зарядної камери (її збільшення), що спричиняє зміну щільності заряджання та тиск формування.

При цьому аналіз даних вищезгаданих досліджень дозволяє визначити погіршення живучості стволів стрілецької зброї при застосуванні боєприпасів тривалих тер-

мінів зберігання. Ці данні і є основою для вирішення означеної задачі прогнозування.

**Метою статті** є визначення впливу показників внутрішньої балістики на зміну інтенсивності зносу ствола та елементів автоматики стрілецької зброї під час стрільби боеприпасами післягарантійних термінів зберігання для прогнозування раціональних термінів зберігання боеприпасів.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз даних досліджень [1, 2, 3, 5, 16, 17] дозволяє прогнозувати погіршення живучості стволів стрілецької зброї при застосуванні боеприпасів тривалих термінів зберігання.

Проблема старіння порохових зарядів та погіршення, у зв'язку з цим, балістичних характеристик зброї відома і не нова. Проте дані досліджень фізико-хімічних змін у порохах охоплюють термін їх зберігання до 5 років, прогнози – до 10 років. Дані про зміни, що відбуваються в порохах за більш тривалих термінів зберігання, відсутні.

У період з 2003 по 2008 роки було проведено систематичні дослідження щодо впливу старіння порохового заряду на балістичні характеристики стрілецької зброї та живучість її стволів [5, 7, 15, 18, 19–22].

Однак ці дослідження охоплювали післягарантійний період зберігання боеприпасів (після 10 років), що не перевищує 22–28 років. В даний час після проведення цих досліджень пройшло більше 20 років, що складає весь досліджений раніше післягарантійний термін. У цьому виникає завдання перевірки застосовності отриманих раніше співвідношень початкової швидкості від терміну зберігання у разі потреби їх корекції.

Результати експериментальних досліджень щодо зміни початкової швидкості кулі 5,45 мм патронів, наведені на рис. 1.

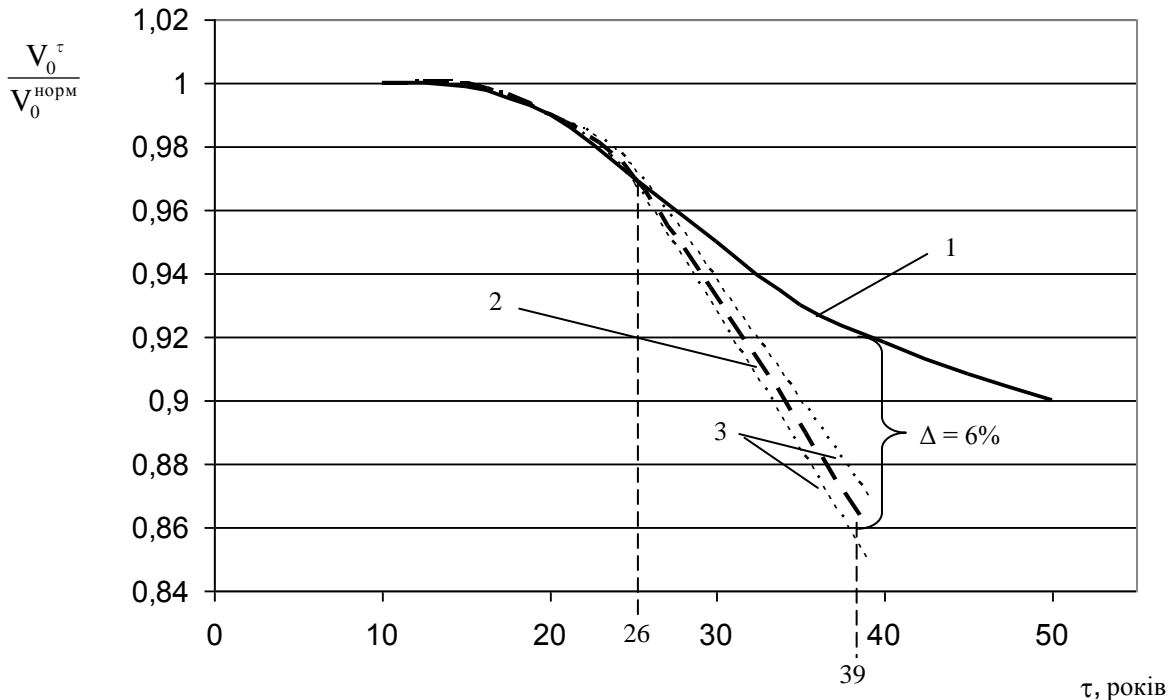


Рисунок 1 – Відносні значення змін початкової швидкості кулі боеприпасів післягарантійного терміну зберігання та раніше спрогнозовані її зміни

1 – прогноз змін початкової швидкості кулі боеприпасів післягарантійного терміну зберігання;  
2, 3 – зміни початкової швидкості кулі боеприпасів з терміном зберігання 39 років та довірчі інтервали

Прогноз здійснювався на основі виразу [5] який має вигляд:

$$\frac{V_0^\tau}{V_0^{\text{норм}}} = 1,04 \cdot 10^{-7} \tau^2 - 1,05 \cdot 10^{-5} \tau + 1,36 \cdot 10^{-3}. \quad (1)$$

Як видно з представлених даних, початкова швидкість кулі 5,45-мм патронів з терміном зберігання 39 років відрізняється від існуючого прогнозу виразу (1) у бік зниження, тобто прогноз оптимістичний. Як очевидно з наведених на рис. 1 графіків, зниження початкової швидкості щодо прогнозного рівняння (чи області прогнозу) становить близько  $\sim 6\%$ . Це перевищує довірчий інтервал виразу 1, у зв'язку з цим виникає завдання побудови нової залежності з урахуванням даних щодо зміни початкової швидкості кулі боєприпасів з терміном зберігання 39 років. В результаті інтерполяції експериментальних даних 39-річного терміну зберігання та попередніх даних щодо зміни початкової швидкості кулі 5,45-мм патронів отримано вираз у вигляді (2):

$$\frac{V_0^\tau}{V_0^{\text{норм}}} = -2 \cdot 10^{-4} \tau^2 + 5,1 \cdot 10^{-4} \tau + 0,97. \quad (2)$$

Отриманий вираз (2) є корекцією виразу (1) і на інтервалі термінів зберігання від 10 до 45 років може застосовуватися для корекції початкової швидкості кулі при розробці початкових умов при стрільбі та прицілюванні.

Таким чином, при експлуатації стрілецької зброї необхідно брати до уваги терміни експлуатації боєприпасів і, відповідно до цього, визначити додаткові заходи щодо контролю стану каналів стволів, які б дозволили обґрунтовано вводити виправлення й проводити коректування прицільних пристосувань по дальності при стрільбі щоб уникнути перевитрати боєприпасів при виконанні вогневих завдань.

Технічний ресурс стволів стрілецької зброї (кількість пострілів) визначається і закладається в технічні характеристики зразка на етапі її розробки та проектування. Для основних зразків ці показники наведені у [6].

Проте, слід зазначити, що це значення справедливі при:

- режим стрільби – середній, без явного перегріву ствола;
- боєприпаси гарантійних термінів зберігання (параметри внутрішньої балістики – табличні).

Контроль стану стволів стрілецької зброї здійснюється, у тому числі, шляхом вимірювання початкової швидкості кулі, яка також змінюється при використанні боєприпасів післягарантійних строків зберігання [4, 5, 9, 15].

Як було встановлено раніше проведеними дослідженнями [5, 10, 12, 15, 19], при застосуванні боєприпасів післягарантійних термінів зберігання збільшується максимальний тиск у каналі ствола, а координата його максимуму зміщується у бік патронника, збільшується швидкість горіння пороху, а сила пороху зменшується.

Враховуючи дані зміни можливо припустити, що технічний ресурс ствола зміниться у зв'язку зі зміною параметрів внутрішньобалістичного процесу.

Для виявлення значень та характеру цих змін були проведені експериментальні дослідження щодо визначення початкової швидкості кулі 5,45-мм автомата Калашникова АК-74.

В експерименті використовувалися чотири нові автомати Калашникова АК-74. Використовувані боєприпаси – 5,45-мм патрони зі звичайною кулею із термінами збері-

гання 33, 30 та 26 років. Режим стрільби – рівномірний, короткими чергами без перегріву стволів.

Вимірювання початкових швидкостей куль проводилося на етапах настрілу стволів – 0, 5000, 7500 та 10000 пострілів. На кожному етапі проведено 60 вимірювань початкової швидкості кулі кожного автомата. При визначенні початкової швидкості кулі використовувалися боеприпаси з терміном зберігання 10 років, щоб уникнути впливу на початкову швидкість геронтологічних змін порохового заряду.

Отримані результати узагальнені у вигляді залежностей зміни початкових швидкостей куль від ресурсу стволів у пострілах (n), які представлені на рис. 2, і описуються такими виразами:

– для боеприпасів гарантованих термінів зберігання

$$V_0^{\text{норм}} = 900 - 5 \cdot 10^{-3} n; \tag{3}$$

– для автоматів (№№ 1, 2, 3)

$$V_0 = 900 + 12n - 5n^2; \tag{4}$$

– для автомата (№ 4)

$$V_0 = 900 + 21,85n - 7,75n^2. \tag{5}$$

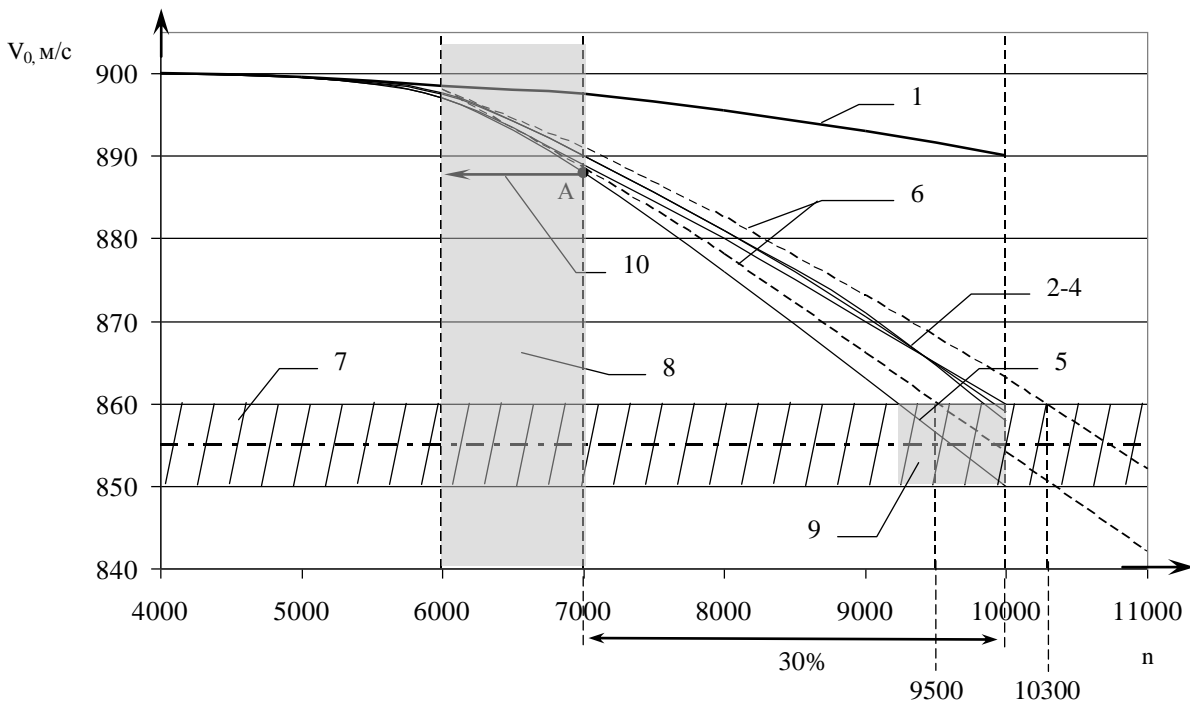


Рисунок 2 – Зміна середніх значень початкових швидкостей куль залежно від ресурсу стволів  
 1 – графік зміни  $V_0$  під час застосування нормальних боеприпасів; 2–4 – графік зміни  $V_0$  автоматів (№ 1, 2, 3); 5 – графік зміни  $V_0$  автомата (№ 4); 6 – смуга можливих значень  $V_0$  з урахуванням коефіцієнта відхилення режиму стрільби; 7 – смуга можливих значень максимально допустимої величини падіння  $V_0$  з урахуванням похибки вимірів; 8 – область початку більш інтенсивної зміни  $V_0$ ; 9 – важко-прогнозований інтервал зносу ствола; 10 – прогнозований перехід погіршення стану ствола при введенні коефіцієнта ведення вогню

Аналіз результатів попередніх досліджень та дані експерименту дозволяють зробити такі висновки:

- лінія 1 – нормальні боєприпаси з гарантійними термінами експлуатації;
- лінії 2, 3, 4 відповідають змінам початкових швидкостей куль трьох автоматів;
- лінія 5 – четвертий автомат, що показав велику інтенсивність зміни початкової швидкості кулі.

Пунктиром відзначено лінію, яка визначає зниження початкової швидкості кулі на 5 % від табличного значення – 855 м/с. Відповідно до [6], однією з причин вибракування ствола є зниження початкової швидкості нижче цієї величини.

З даних рис. 2 видно, що зміни  $V_0$  всіх чотирьох автоматів практично збігаються до точки, що дорівнює  $\sim 7000$  пострілів. Ця частина графіка відрізняється від нормальної експлуатації ствола з нормальними боєприпасами на величину, що не перевищує 0,4 %.

При застосуванні боєприпасів тривалих термінів зберігання найкращим результатом є лінії 2, 3, 4 – три автомати, значення початкових швидкостей куль яких фактично на 10000 пострілів приходять до 5 % зниження. Один зразок перетинає лінію бракування ствола “недопрацьовуючи”  $\sim 8$  % ресурсу.

Характерною точкою на графіку є координата 7000 пострілів. Враховуючи дискретний характер контролю початкової швидкості  $V_0$  при проведенні експерименту, можна припустити, що початок інтенсивнішої зміни  $V_0$  лежить в діапазоні  $\sim 5800$ –7000 пострілів. Точка в 7000 пострілів – це 70 % ресурсу, тобто на залишковому ресурсі ствола в 30 % починаються суттєвіші відхилення  $V_0$  і інтенсивність вичерпання ресурсу ствола зростає. При цьому можна припустити, що при більш інтенсивному режимі ведення вогню координата точки початку інтенсивного падіння початкової швидкості зміщуватиметься до 6000 пострілів.

Аналіз даних рис. 2 показує, що на розрахованому режимі експлуатації при 10000 пострілів нормальними боєприпасами, без перевищення гарантійних строків зберігання, початкова швидкість кулі повинна складати  $\sim 890$  м/с. При застосуванні боєприпасів 30 років зберігання на 10000 пострілах мається фактично встановлене для 75 % випробуваної стрілецької зброї початкова швидкість кулі 860 м/с, при цьому допустиме 5% відхилення початкової швидкості кулі складає 855 м/с. Таким чином при застосуванні боєприпасів 30 років зберігання мається запас в  $\Delta V_0$  5 м/с який слід розглядати як той, що знаходиться в межах похибки визначення  $V_0$  фактичного.

У результаті візуального контролю та із застосуванням калібрів встановлено:

1. Розпал газової трубки і газової камери (рис. 3).



Рисунок 3 – Раковини розпалу на елементах газового тракту використаних автоматів

2. Затримки під час стрільби – осічки та уतिकання патрона після 6500 пострілів. Припустимий фактор, який впливає – знос кульного входу, через що відбувається “провал” патрона і внаслідок цього недостатнє наколювання капсуля бойком ударника.

3. Випадання осі спускового механізму припустимий фактор, який впливає – осадка пружини автоспуску з-за збільшеної швидкості руху затворної рами внаслідок підвищення тиску порохових газів на ділянці газовідвідного отвору.

За нормативом, що на 500 пострілів одного автомата допускається 1 затримка, що пов’язана з роботою автоматики [4, 20], початок різкого підвищення інтенсивності затримок під час стрільби й прояв несправностей розташовується саме в діапазоні перегику –5800–7000 пострілів.

В експерименті момент початку підвищення інтенсивності зносу ствола в 70% отримали на певній вибірці, таким чином експериментальну групу автоматів можна розділити за роками виробництва наступним чином (рис. 4).

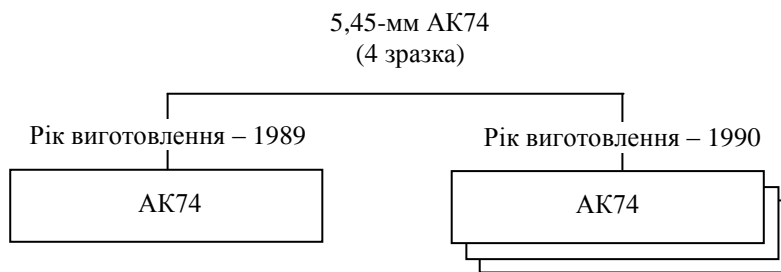


Рисунок 4 – Група автоматів за роками виробництва

Один автомат 1989 року та два автомати 1990-го року показали більшу стійкість стволів до впливу внутрібалістичних чинників, викликаних геронтологічними змінами в пороховому заряді, а один автомат 1990-го року, що відповідає тій же технології виробництва, що й решта, показав підвищену інтенсивність зносу ствола. Можна очікувати, що 25 % зразків будуть показувати такі результати. Таким чином ця картина характерна тим, що після 9300 пострілів (93 % ресурсу) починається важкопрогнозований інтервал зносу, який характеризується некоригованою стрільбою. Якщо показники  $V_0$  трьох автоматів розташовані в діапазоні 5-відсоткового зниження й можна за допомогою пристрілки та введення поправок говорити про можливість подальшої експлуатації даних зразків, то з четвертим зразком за допомогою корекції важко домогтися позитивних результатів під час стрільби. Такі данні треба брати до уваги, щодо прогнозування даних рис. 2 з огляду на те, що приблизно 25 % зразків стрілецької зброї можуть давати більш песимістичний прогноз щодо початкової швидкості кулі та зношування. Причини такого стану потребують подальших досліджень.

Основним результатом експериментальних досліджень слід вважати виявлену закономірність зміни початкової швидкості кулі, пов’язану з розстрілом ствола та його зносом, а також елементів автоматики й газового тракту, що викликано застосуванням боєприпасів тривалих термінів зберігання та факторів внутрішньої балістики, які впливають на це.

Що і стало підставою для визначення раціональних термінів зберігання боєприпасів для стрілецької зброї.

Таким чином, проблема забезпечення ресурсу стволів і система забезпечення



якості боеприпасів при експлуатації ствольних систем може бути вирішена на основі отриманих залежностей (3–5) зносу ствола від кількості пострілів.

Таким чином аналіз наведених даних дозволяє спрогнозувати раціональний термін зберігання боеприпасів до стрілецької зброї, який складає 17–21 рік, а кількість пострілів якою слід обмежувати для відповідної партії боеприпасів такою, що залежить від режиму ведення вогню. При суттєвій зміні інтенсивності ведення вогню залишковий ресурс ствола необхідно оцінювати окремо відповідно до наведеної методики. Однак в умовах бойового застосування стрілецької зброї майже неможливо відстежувати такі відхилення, тому доцільним є застосування відповідних маркерів на стволах [23, 24], які інформували про перегрів ствола, який є основним критерієм щодо підвищення інтенсивності вичерпання ресурсу ствола.

**Висновки.** У результаті комплексного теоретичного й експериментального дослідження вирішена важлива для Збройних Сил та Оборонно-промислового комплексу України науково-технічна та військово-прикладна задача щодо раціональних термінів зберігання боеприпасів за умови мінімізації впливу на автоматичну зброю та її балістичні характеристики.

Отримані залежності зміни показників зносу ствола й елементів автоматики стрілецької зброї від терміну експлуатації боеприпасів дають можливість визначати зміни початкової швидкості кулі, пов'язані з розстрілом ствола та його зносом, а також елементів автоматики, що викликано застосуванням боеприпасів тривалих термінів зберігання.

На основі проведених досліджень можливе обґрунтування раціональних термінів зберігання боеприпасів до стрілецької зброї, що забезпечують виконання тактико-технічних вимог для конкретного зразка озброєння й переведення їх до групи для вирішення навчальних завдань з відповідною корекцією дальності стрільби.

Експериментально визначено кількість пострілів ( $\approx 7000$ ), після чого починається більш інтенсивний знос каналу ствола.

Необхідно переглянути норми забезпечення ремонтних органів запасними частинами зі зміною їх кількісного складу ( $\approx + 25\%$ ) та розширенням номенклатури (повний комплект автоматики, газова трубка).

#### Література

1. Буллер М.Ф., Межевич Г.В. Методы испытания утилизируемых порохов. К.: Изд-во ООО “ДИА”, 2005. 94 с.
2. Ассовский И.Г. Физика горения и внутренняя баллистика. М.: Наука. 2005. 357 с.
3. Анипко О.Б., Тараненко С.В., Хайков В.Л. Система мониторинга пороховых зарядов боеприпасов корабельной артиллерии // Зб. наукових праць АВМС. – Севастополь. 2010. Вип.4(4). С. 11–18.
4. Саукум С. Суть оружия. Ствол. Одесса: Изд-во “Печатный дом”. 2009. 214 с.
5. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. Монография. Х.: АВВ МВД Украины, 2010. 128 с.
6. Інструкція про порядок категорювання ракетно-артилерійського озброєння.

Наказ МВС України від 08.11.2017 № 912. К.: 2017.

7. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Горелишев С.А. Геронтологічні властивості порохових зарядів боеприпасів та їх вплив на показники живучості стрілецької зброї. Монографія. Х.: Національна академія НГУ, 2019. 119 с.

8. Оцінка живучості ствольних систем озброєння при використанні боеприпасів довготривалих термінів зберігання [Текст] : звіт про НДР / Акад. внутрішніх військ МВС України; керівн. О.Б. Аніпко; викон. : Д.С. Баулін, О.О. Муленко.– Х., 2010.– 51 с.

9. Анипко О.Б. Экспериментальное исследование износа ствола 5,45 мм автомата Калашникова АК-74 при стрельбе боеприпасами длительных сроков хранения / О.Б. Анипко, А.О. Муленко, Д.С. Баулин // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2013. №2. С. 121–125.

10. Рекомендації щодо аналізу стану та бойового і навчально-бойового використання боеприпасів, строк експлуатації яких закінчився (більш 15 років) до стрілецької зброї та артилерійського озброєння [Текст] : звіт про НДР / Акад. внутрішніх військ МВС України; керівн. О.Б. Аніпко; викон. : Д.С. Баулін [та ін.]. Х. 2007. 91 с.

11. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Методы термодинамики, тепло- и массопереноса для решения обратной задачи внутренней баллистики // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2005. №2. С. 63–68.

12. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю. Зависимость начальной скорости снаряда от максимального давления в канале ствола при выстреле артиллерийскими зарядами длительных сроков хранения // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2006. №1. С. 83–86.

13. Бирюков И.Ю. Пороховые заряды длительных сроков хранения: проблемы, задачи и пути их решения // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2006. №2. С. 50–55.

14. Анипко О.Б., Хайков В.Л. Анализ методов оценки состояния пороховых зарядов как элемент системы мониторинга артиллерийских боеприпасов // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Национальный технический университет “ХПИ”. 2012. №3. С. 60–71.

15. Особливості характеристик внутрішньої балістики порохових зарядів боеприпасів, які знаходяться за межами гарантійних строків зберігання : навчально-методичний посібник [для вищ. навч. закл.] / О.Б. Аніпко, І.Ю. Бірюков, Д.С. Баулін, В.І. Воробйов. – Х.: Акад. внутрішніх військ МВС України. 2008. 40 с.

16. Анипко О.Б., Баулин Д.С., Бусяк Ю.М. Обратная задача внутренней баллистики для прогнозирования свойств порохов при длительном их хранении // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2005. №4. С. 109–114.

17. Анипко О.Б., Муленко А.О., Баулин Д.С., Хань С.П. Коррекция зависимости начальной скорости пули 7,62-мм винтовочного патрона по результатам экспериментальных стрельб // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2012. №2. С. 21–23.

18. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Баулин Д.С. Модель массопереноса при хранении пороховых зарядов с учетом изменения температуры окружающей среды // Збірник наукових праць ХУПС ім. І Кожедуба. 2006. №2 (8). С. 50–54.

19. Анипко О.Б., Баулин Д.С., Бирюков И.Ю. Влияние длительности хранения боеприпасов на баллистические характеристики стрелкового оружия // Интегровані технології та енергозбереження. Х.: Изд-во НТУ “ХПІ”, 2007. №2. С. 97–100.

20. Баулін Д.С., Бірюков І.Ю. Експлуатаційні характеристики стрілецького озброєння при використанні боєприпасів довготривалого зберігання // Інтегровані технології та енергозбереження. Х.: Ізд-во НТУ “ХП”, 2008. №2. С. 113–117.

21. Баулін Д.С. Експериментальне дослідження впливу конструктивних характеристик боєприпасів на початкову швидкість куль // Збірник наукових праць “НАДПС України ім. Б.Хмельницького”. 2004. №31. Частина II. С. 5–7.

22. Муленко О.О., Павленко А.М. Боєприпаси післягарантійних термінів зберігання: їх вплив на живучість стволів стрілецької зброї. Збірник тез доповідей Міжнародної науково-практичної конференції “Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення”, Харків: НАНГУ, 28 березня 2024 р., С. 42–43.

23. Биленко А.И. О влиянии теплового состояния ствола оружия на начальную скорость пули // Системы обработки информации. 2002. №2(18). С. 28–32.

24. Приходько І.М., Черніченко Ю.М., Біленко О.І. Підвищення ефективності бойового використання автоматичної стрілецької зброї за рахунок контролю температури нагріву стволів. Щоквартальний науково-практичний журнал ВВ МВС України “Честь і закон”. – Харків: ВІ ВВ МВС України, 2002. №3. С. 39–41.

#### Bibliography (transliterated)

1. Buller M.F., Mezhevich G.V. Metody ispytaniya utiliziruyemykh porokhov. K.: Ízd-vo ООО “DÍA”, 2005. 94 p.

2. Assovskiy I.G. Fizika goreniya i vnutrennyaya bal listika. M.: Nauka. 2005. 357 p.

3. Anipko O.B., Taranenko S.V., Khaykov V.L. Sistema monitoringa porokhoviykh zaryadov boyepripasov korabel'noy artillerii // Zb. nakovikh prats' AVMS. – Sevastopol'. 2010. Vip.4(4). P. 11–18.

4. Saukum S. Sut' oruzhiya. Stvol. Odessa: Ízd-vo “Pechatnyy dom”. 2009. 214 p.

5. Anipko O.B., Busyak YU.M. Vnutrennyaya ballistika stvol'nykh sistem pri primenenií boyepripasov dlitel'nykh srokov khraneniya. Monografiya. KH.: AVV MVD Ukrainy, 2010. 128 p.

6. Ínstruktsiya pro poryadok kategoruvannya raketno-artileriy's'kogo ozbroënnya. Nakaz MVS Ukraïni víd 08.11.2017 № 912. K.: 2017.

7. Anipko O.B., Baulin D.S., Gorelishev S.A. Gerontologichni vlastivosti porokhoviykh zaryadiv bopripasiv ta ikh vpliv na pokazniki zhivuchosti strilets'koï zbroï. Monografiya. KH.: Natsional'na akademiya NGU, 2019. 119 p.

8. Otsínka zhivuchosti stvol'nykh sistem ozbroënnya pri vikoristanni boëpripasiv dovgotrivalikh terminiv zberigannya [Tekst] : zvit pro NDR / Akad. vnutrishnikh viys'k MVS Ukraïni; kerivn. O.B. Anipko; vikon. : D.S. Baulin, O.O. Mulenko. – KH., 2010. – 51 p.

9. Anipko O.B. Eksperimental'noye issledovaniye iznosa stvola 5,45 mm avtomata Kalashnikova AK-74 pri strel'be boyepripasami dlitel'nykh srokov khraneniya / O.B. Anipko, A.O. Mulenko, D.S. Baulin // Íntegrovani tekhnologii ta yenergozberzhennya. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2013. №2. P. 121–125.

10. Rekomendatsii shchodo analizu stanu ta boyovogo i navchal'no-boyovogo vikoristannya boëpripasiv, strok yekspluatatsii yakikh zakínchivsiya (bíl'sh 15 rokiv) do strilets'koï zbroï ta artileriy's'kogo ozbroënnya [Tekst] : zvit pro NDR / Akad. vnutrishnikh viys'k MVS Ukraïni; kerivn. O.B. Anipko; vikon. : D.S. Baulin [ta ín.]. KH. 2007. 91 p.

11. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Metody termodinamiki, teplo- i massoperenosa dlya

resheniya obratnoy zadachi vnutrenney ballistiki // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2005. №2. P. 63–68.

12. Anipko O.B., Biryukov I.Yu. Zavisimost' nachal'noy skorosti snaryada ot maksimal'nogo davleniya v kanale stvola pri vystrele artilleriyskimi zaryadami dlitel'nykh srokov khraneniya // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2006. №1. P. 83–86.

13. Biryukov I.Yu. Porokhovyye zaryady dlitel'nykh srokov khraneniya: problemy, zadachi i puti ikh resheniya // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2006. №2. P. 50–55.

14. Anipko O.B., Khaykov V.L. Analiz metodov otsenki sostoyaniya porokhovyykh zaryadov kak element sistemy monitoringa artilleriyskikh boyepripasov // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Natsional'nyy tekhnicheskyy universitet “KHPÍ”. 2012. №3. P. 60–71.

15. Osoblivostí kharakteristik vnutrishn'oi balistiki porokhovikh zaryadiv boëpripasiv, yakí znakhodyat'sya za mezhami garantiynikh strokiv zberigannya : navchal'no-metodichniy posibnik [dlya vishch. navch. zakl.] / O.B. Anipko, I.Yu. Biryukov, D.S. Baulin, V.I. Vorobyov. – KH.: Akad. vnutrishnikh víys'k MVS Ukraïni. 2008. 40 p.

16. Anipko O.B., Baulin D.S., Busyak YU.M. Obratnaya zadacha vnutrenney ballistiki dlya prognozirovaniya svoystv porokhov pri dlitel'nom ikh khranenni // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2005. №4. P. 109–114.

17. Anipko O.B., Mulenko A.O., Baulin D.S., Khan' S.P. Korrektsiya zavisimosti nachal'noy skorosti puli 7,62-mm vintovochnogo patrona po rezul'tatam eksperimental'nykh strel'by // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2012. №2. P. 21–23.

18. Anipko O.B., Biryukov I.Yu., Baulin D.S. Model' massoperenosa pri khranenni porokhovyykh zaryadov s uchetom izmeneniya temperatury okruzhayushchey sredy // *Zbírnik naukovikh prats' KHUPS ím. Í Kozheduba*. 2006. №2 (8). P. 50–54.

19. Anipko O.B., Baulin D.S., Biryukov I.Yu. Vliyanie dlitel'nosti khraneniya boyepripasov na ballisticheskoye kharakteristiki strelkovogo oruzhiya // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2007. №2. P. 97–100.

20. Baulin D.S., Biryukov I.Yu. Yekspluatatsiyní kharakteristiki strílets'kogo ozbroënnya pri vikoristanni boëpripasiv dovgotrivalogo zberigannya // *Íntegrovaní tekhnologíi ta yenergozberezhennya*. KH.: Ízd-vo NTU “KHPÍ”, 2008. №2. P. 113–117.

21. Baulin D.S. Eksperymental'ne doslidzhennya vplyvu konstruktyvnykh kharakterystyk boyepripasiv na pochatkovu shvydkist' kul' // *Zbírnyk naukovykh prats' “NADPS Ukrayiny im. B. Khmel'nyts'koho”*. 2004. №31. Chastyna II. P. 5–7.

22. Mulenko O.O., Pavlenko A.M. Boyepripasy pisyaharantiynykh terminiv zberihannya: yikh vplyv na zhyvuchist' stvoliv strílets'koyi zbroyi. *Zbírnyk tez dopovidey Mizhnarodnoyi naukovo-praktychnoyi konferentsiyi “Aktual'ni problemy diyal'nosti skladovykh sektoru bezpeky i oborony Ukrayiny v umovakh osoblyvykh pravovykh rezhymiv: potochnyy stan ta shlyakhy vyrishennya”*, Kharkiv: NANHU, 28 bereznya 2024 r., P. 42–43.

23. Bylenko A.Y. O vlyanyy teplovoho sostoyaniya stvola oruzhyya na nachal'nyuy skorost' puly // *Systemy obrobky informatsiyi*. 2002. №2(18). P. 28–32.

24. Prykhod'ko I.M., Chernichenko YU.M., Bilenko O.I. Pidvyshchennya efektyvnosti boyovoho vykorystannya avtomatychnoyi strílets'koyi zbroyi za rakhunok kontrolyu temperatury nahrivu stvoliv. *Shchokvartal'nyy naukovo-praktychnyy zhurnal VV MVS Ukrayiny “Chest' i zakon”*. – Kharkiv: VI VV MVS Ukrayiny, 2002. №3. P. 39–41.

УДК 623.522

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, І. Ю. Бірюков, д. техн. н., професор,  
Д. С. Баулін, к. техн. н., с. н. с., О. О. Муленко, викладач кафедри

### РАЦІОНАЛЬНІ ТЕРМІНИ ЗБЕРІГАННЯ БОЄПРИПАСІВ ЗА УМОВИ МІНІМІЗАЦІЇ ВПЛИВУ НА АВТОМАТИЧНУ ЗБРОЮ ТА ЇЇ БАЛІСТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Серед великої розмаїтості вимог, пропонованих до сучасної стрілецької зброї, можна виділити безвідмовну роботу зразка озброєння, що досягається забезпеченням необхідної живучості деталей і механізмів автоматичної зброї.

Динамічний характер зусиль і напруг, що діють на деталі автоматичної зброї, утрудняє забезпечення їхньої міцності і є однією з головних причин порівняно низької живучості. Особливе значення має забезпечення достатньої живучості ствола, що грає вирішальну роль у загальній живучості зброї.

Показано основні причини зношування каналу ствола. Доведено, що з ростом зношування погіршуються балістичні характеристики, які приводять відповідно до збільшення кількості боєприпасів необхідних на виконання вогневого завдання, а також до зменшення дальності гарантованого пробиття перешкоди.

Доведено, що тривале зберігання боєприпасів приводить до зміни фізико-хімічних характеристик порохів. Визначено, що такі зміни суттєво впливають на показники параметрів внутрішньої балістики під час пострілу. Тому ресурс ствола визначається зміною показників внутрішньої балістики, обумовлених геронтологічними змінами порохового заряду.

Представлено результати експериментальних досліджень щодо впливу старіння порохового заряду на балістичні характеристики стрілецької зброї та живучість її стволів.

Аналіз отриманих даних досліджень дозволяє спрогнозувати раціональний термін зберігання боєприпасів до стрілецької зброї, який складає 17–21 рік, а кількість пострілів якою слід обмежувати для відповідної партії боєприпасів такою, що залежить від режиму ведення вогню. Отримані залежності дають можливість визначати зміни початкової швидкості кулі, пов'язані з розстрілом ствола та його зносом, а також елементів автоматики, що викликано застосуванням боєприпасів тривалих термінів зберігання.

На основі проведених досліджень можливе обґрунтування раціональних термінів зберігання боєприпасів до стрілецької зброї, що забезпечують виконання тактико-технічних вимог для конкретного зразка озброєння.

**Ключові слова:** стрілецька зброя, ствол, раціональні терміни зберігання боєприпасів, нітроцелюлозні порох, балістичні характеристики зброї, максимальний тиск, початкова швидкість кулі, експериментальні дослідження, інтенсивність вичерпання живучості.

O. Anipko, I. Biryukov, D. Baulin, O. Mulenko

**RATIONAL TERMS OF STORAGE OF AMMUNITION UNDER THE CONDITIONS OF MINIMIZING THE IMPACT ON THE AUTOMATIC WEAPON AND ITS BALLISTIC CHARACTERISTICS**

Among the wide variety of requirements proposed for modern small arms, it is possible to single out the trouble-free operation of a sample of weapons, which is achieved by ensuring the necessary survivability of parts and mechanisms of automatic weapons.

The dynamic nature of the forces and stresses acting on the parts of automatic weapons makes it difficult to ensure their strength and is one of the main reasons for the relatively low survivability. Of particular importance is the provision of sufficient survivability of the barrel, which plays a decisive role in the overall survivability of the weapon.

The main causes of barrel bore wear are shown. It has been proven that with the growth of wear and tear, the ballistic characteristics deteriorate, which leads, accordingly, to an increase in the amount of ammunition required to perform a firing task, as well as to a decrease in the range of guaranteed penetration of an obstacle.

It has been proven that long-term storage of ammunition leads to changes in the physical and chemical characteristics of gunpowder. It was determined that such changes significantly affect the parameters of internal ballistics during a shot. Therefore, the resource of the barrel is determined by the change in internal ballistics indicators caused by gerontological changes in the powder charge.

The results of experimental studies on the effect of powder charge aging on the ballistic characteristics of small arms and the survivability of their barrels are presented.

The analysis of the obtained research data allows us to predict the rational storage period of ammunition for small arms, which is 17–21 years, and the number of shots that should be limited for the corresponding batch of ammunition depends on the mode of firing. The resulting dependencies make it possible to determine changes in the initial velocity of the bullet associated with the firing of the barrel and its wear, as well as automation elements caused by the use of ammunition with long storage periods.

**Keywords:** small arms, barrel, rational terms of storage of ammunition, nitrocellulose powders, ballistic characteristics of weapons, maximum pressure, initial speed of the bullet, experimental studies, intensity of depletion of survivability.

Р. В. Кривобок, к. техн. н., доцент, Я. М. Пітак, д. техн. н., професор,  
О. Ю. Федоренко, д. техн. н., професор, В. В. Волощук, д-р філософії,  
Є. В. Чефранов, д-р філософії, О. О. Гребенюк, аспірант, О. Р. Тимченко, аспірант

## ВИВЧЕННЯ РЕАКЦІЙ ОБМІНУ В СИСТЕМІ $\text{SrO-BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*

**Ключові слова:** цельзіан, славсоніт, тверді розчини, реакції обміну, термодинаміка, ентальпія, ентропія, вільна енергія Гіббса.

**Вступ.** Наукові дослідження в галузі нанотехнологій і композитних матеріалів дозволяють розробляти нові типи радіопрозорих матеріалів з покращеними характеристиками – легкі, міцні, з високою тепловою стійкістю. Такі матеріали стають більш доступними та можуть використовуватися в широкому спектрі галузей. Розвиток радіопрозорих матеріалів в Україні має значний потенціал завдяки науково-дослідним центрам та інститутам, що зосереджуються на матеріалознавстві та прикладних науках.

Неорганічні радіопрозорі матеріали відзначаються рівномірністю властивостей, здатністю витримувати високі температури та зберігати стабільні електрофізичні та електродинамічні параметри в широкому спектрі радіочастот. Водночас, значна частина наявних радіопрозорих керамічних матеріалів (кварцові, високоглиноземні, цирконієві, нітридні, боридні тощо) за сукупністю експлуатаційних характеристик, необхідних для тривалої та ефективної роботи виробів, не відповідає вимогам виробників аерокосмічної техніки та вирізняються низкою недоліків, зокрема високою вартістю сировинних матеріалів та складною багатостадійною технологією виробництва, що вимагає високотемпературної обробки [1–4].

Відомо, що керамічні матеріали на основі композицій системи  $\text{SrO-BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  володіють низькими значеннями показників діелектричних властивостей та є надзвичайно перспективними в різних галузях, де має місце висока пропускна здатність для електромагнітних хвиль без значних втрат. Так, тверді розчини  $(\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8)$  є привабливими: як керамічні композитні матриці для використання в конструкціях, що експлуатуються за умов високих температур; керамічні компоненти в сучасних газотурбінних двигунах; елементи авіаційної техніки тощо [4–9].

В попередніх дослідженнях вченими [10,11] встановлена можливість протікання спряжених реакцій в системі  $\text{SrO-BaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , що в окремих випадках призводить до перебудови конод. Дані проведених термодинамічних розрахунків підтверджують, що до 1200 К фаза  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4$  не реагує з фазою  $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , проте в інтервалі температур 1200-1700 К реакція стає термодинамічно можливою з утворенням комбінації фаз  $\text{BaSiO}_3 - \text{BaAl}_2\text{O}_4 - \text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  (“заповнений контур”), що слід враховувати при подальшому дослідженні субсолідусної будови системи.

**Основна частина.** Під час вивчення багатокомпонентних оксидних систем варто враховувати можливість протікання реакцій обміну [12] у вигляді  $\text{AX+BY} = \text{AY+BX}$  або  $\text{aA+bB} = \text{cC+dD}$ . В технології отримання твердих матеріалів, таких як кераміка чи вогнетриви, суттєве значення має субсолідусна будова багатокомпонентних систем, у яких немає (чи присутні незначні) обмінних реакцій, а також визначення їх

температурних меж. Процеси перебудови конод в системі є непрогнозованими та потребують щоразу проведення спеціального аналізу, який суттєво ускладнює пошук елементарних комбінацій фаз та інколи робить їх умовними. Тим не менш, на даний час це єдиний шлях дослідження субсолідусної будови багатокомпонентних оксидних систем, який може надавати актуальні прикладні результати.

В даному випадку була розглянута можливість протікання реакцій типу  $aA + bB = cC + dD$  в межах концентраційного тетраедру  $SrO - BaO - Al_2O_3 - SiO_2$ . Основні сполуки та їх композиції в системі переважно застосовують при отриманні матеріалів зі спеціальними властивостями, зокрема для розробки засобів радіоспостереження в авіаційній техніці, як захист антенних пристроїв від впливу зовнішніх факторів тощо [13,14].

Спочатку для визначення можливості перебігу реакцій обміну в системі  $SrO - BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  необхідно встановити її субсолідусну будову. Першим етапом дослідження є встановлення співіснуючих фаз і визначення температурних границь можливих реакцій в системі. Для встановлення температурних границь протікання реакцій застосовували термодинамічний метод аналізу.

Для виявлення співіснування фаз та будови окремих областей системи був проведений термодинамічний аналіз цих реакцій з використанням термодинамічних констант, наведених в табл. 1 [15,16].

Розрахунки вільної енергії Гіббса для реакцій проводили за методикою наведеною нижче.

- 1) Визначаємо ентальпію реакції при 298 К за такою формулою:

$$\Delta H_{298p}^0 = \sum \Delta H_{298}^0 \text{ продуктів} - \sum \Delta H_{298}^0 \text{ вихідних речовин}, \quad (1)$$

де  $\sum \Delta H_{298}^0$  продуктів – сума продуктів реакції, кДж;  $\sum \Delta H_{298}^0$  вихідних речовин – сума вихідних речовин, кДж.

- 2) Визначаємо ентропію реакції при 298 К за формулою

$$\Delta S_{298p}^0 = \sum \Delta S_{298}^0 \text{ продуктів} - \sum \Delta S_{298}^0 \text{ вихідних речовин}, \quad (2)$$

де  $\sum \Delta S_{298}^0$  продуктів – сума продуктів реакції, Дж;  $\sum \Delta S_{298}^0$  вихідних речовин – сума вихідних речовин, Дж.

- 3) Визначаємо коефіцієнти рівняння залежності теплоємності від температури реакції, виражаючи його у вигляді  $\Delta C_p = \Delta a + \Delta b \cdot T + \Delta c \cdot T^2$ :

$$\Delta C_{p,298}^0 = \sum \Delta C_{p,298}^0 \text{ продуктів} - \sum \Delta C_{p,298}^0 \text{ вихідних речовин}, \quad (3)$$

де  $\sum \Delta C_{p,298}^0$  продуктів – сума коефіцієнтів продуктів реакції;  $\sum \Delta C_{p,298}^0$  вихідних речовин – сума коефіцієнтів вихідних речовин.

- 4) Підставляємо значення  $\Delta H_{298}^0$  і  $\Delta C_p = f(T)$  у формулу для визначення  $\Delta H_T^0$ :

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p dT. \quad (4)$$

де  $\Delta H_{298p}^0$  – ентальпія реакції при 298 К;  $\Delta C_p = f(T)$  – залежність теплоємності від температури реакції.

- 5) Знаючи  $\Delta S_{298}^0$  і  $\Delta C_p = f(T)$ , визначаємо  $\Delta S_T^0$  за формулою





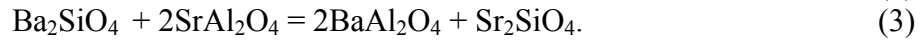
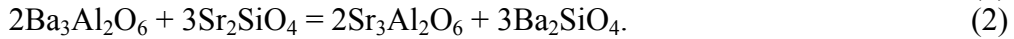
$$\Delta S_T^0 = \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT. \quad (5)$$

де  $\Delta S_{298}^0$  – ентропія реакції при 298 К;  $\Delta C_p = f(T)$  – залежність теплоємності від температури реакції

б) Знаючи  $\Delta H_T^0$  і  $\Delta S_T^0$ , визначаємо  $\Delta G_T^0$  за формулою

$$\Delta G_T^0 = \Delta H_T^0 - T\Delta S_T^0. \quad (6)$$

Розгляд субсолідусної будови системи SrO – BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>, наведеної в роботах [18, 19] показав, що має місце низка реакцій обміну типу aA + bB = cC + dD:



Залежність  $\Delta G_T^0$  від температури для реакції (1) наведена на рис. 1.

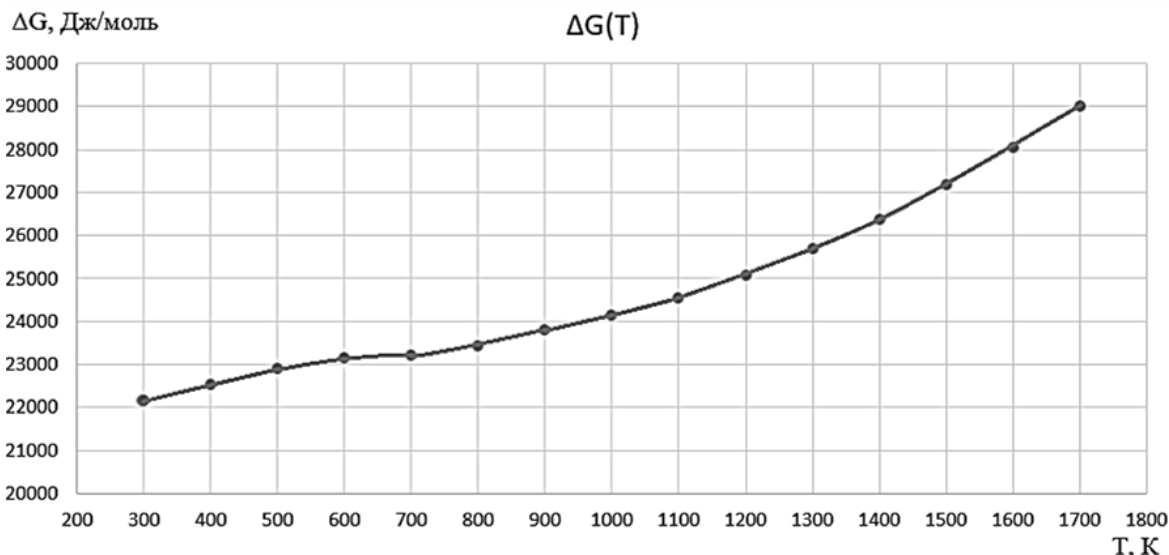


Рисунок 1 – Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{SrAl}_2\text{O}_4 = \text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 + \text{BaAl}_2\text{O}_4$

З рис. 3.9 видно що  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  не реагує з  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  в інтервалі температур 300...1700 К. Тоді область системи  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{SrAl}_2\text{O}_4 - \text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{BaAl}_2\text{O}_4$  розбивається на 2 елементарні трикутники (рис. 2):  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{SrAl}_2\text{O}_4 - \text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  і  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{SrAl}_2\text{O}_4 - \text{BaAl}_2\text{O}_4$ .

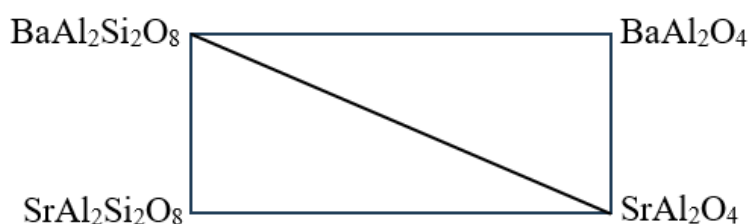


Рисунок 2 – Елементарні трикутники області  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{SrAl}_2\text{O}_4 - \text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8 - \text{BaAl}_2\text{O}_4$  системи  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$

Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції (2) наведена на рис. 3, з якого виходить, що в інтервалі температур 300...1700 К  $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  реагує з  $\text{Sr}_2\text{SiO}_4$  з утворенням комбінації фаз  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Ba}_2\text{SiO}_4$ . При цьому область системи  $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Sr}_2\text{SiO}_4 - \text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Ba}_2\text{SiO}_4$  розбивається на два елементарні трикутники (рис. 4).

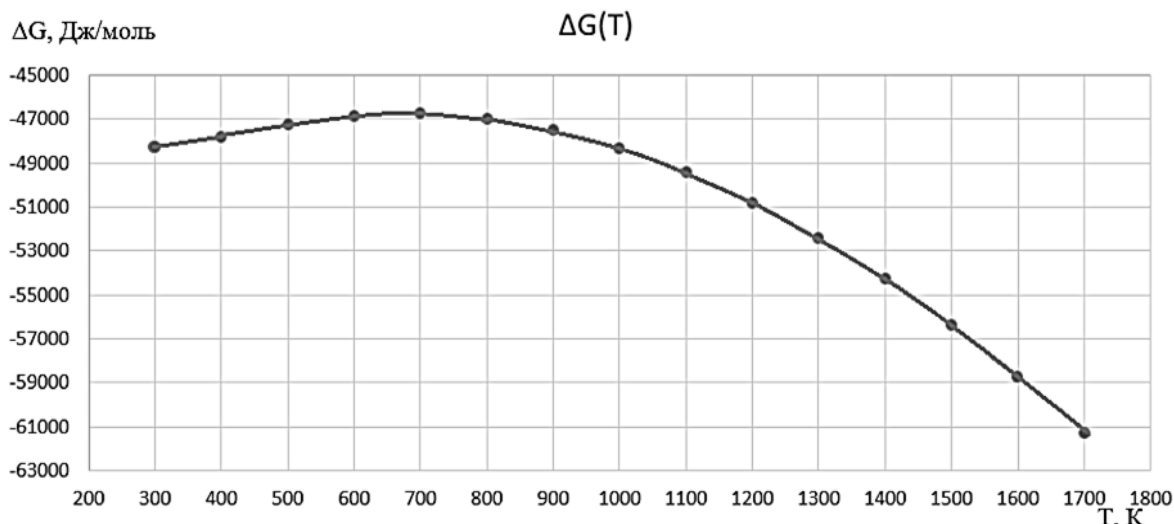


Рисунок 3 – Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції  $2\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 3\text{Sr}_2\text{SiO}_4 = 2\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 + 3\text{Ba}_2\text{SiO}_4$

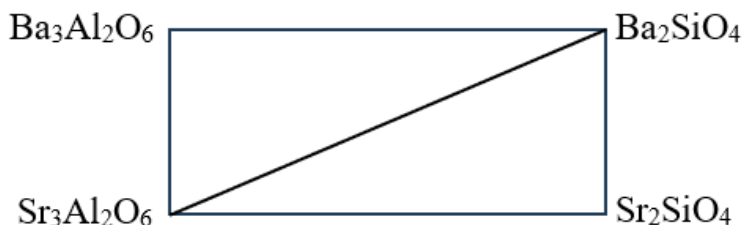


Рисунок 4 – Елементарні трикутники області  $\text{Ba}_3\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Sr}_2\text{SiO}_4 - \text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6 - \text{Ba}_2\text{SiO}_4$  системи  $\text{SrO} - \text{BaO} - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2$  в інтервалі температур 300...1700 К

З температурної залежності вільної енергії Гіббса для реакції (3), наведеної на рис. 5. Видно, що в інтервалі температур 300...875 К  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4$  не реагує з  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$ .

Стабільною є комбінація фаз  $Ba_2SiO_4 - SrAl_2O_4$ . При цьому область системи  $Ba_2SiO_4 - SrAl_2O_4 - BaAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$  розбивається на два елементарні трикутники:  $Ba_2SiO_4 - SrAl_2O_4 - BaAl_2O_4$  і  $Ba_2SiO_4 - SrAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$  (рис. 6 а).

В інтервалі температур 875...1700 К фаза  $Ba_2SiO_4$  реагує зі  $SrAl_2O_4$  з утворенням стабільної комбінації фаз  $BaAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$ . Має місце перебудова конод і область системи  $Ba_2SiO_4 - SrAl_2O_4 - BaAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$  розбивається на два елементарні трикутники:  $Ba_2SiO_4 - BaAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$  та  $SrAl_2O_4 - BaAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$  (рис. 6 б).

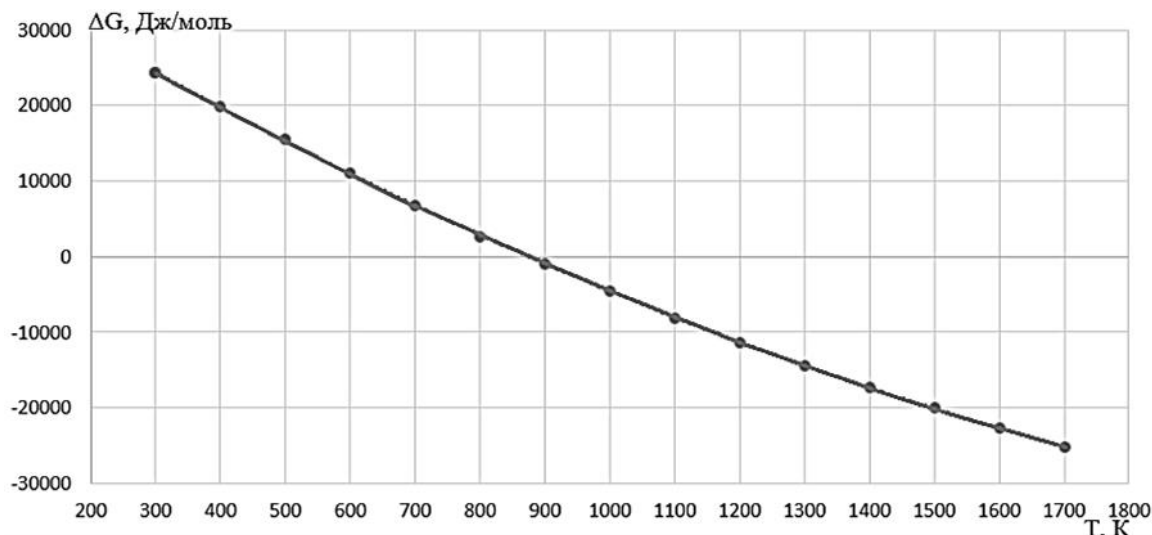


Рисунок 5 – Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції  $Ba_2SiO_4 + 2SrAl_2O_4 = 2BaAl_2O_4 + Sr_2SiO_4$

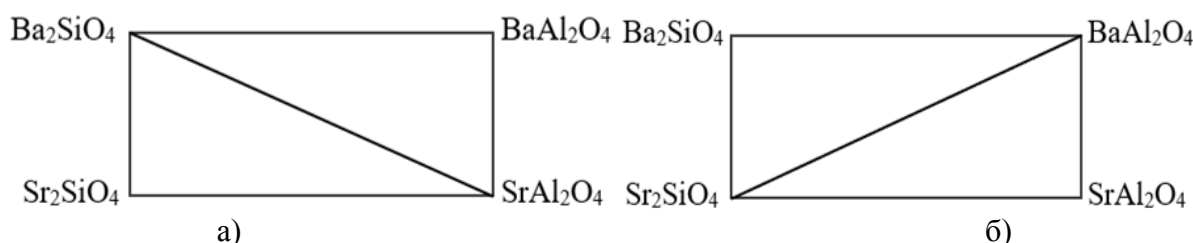


Рисунок 6 – Елементарні трикутники області  $Ba_2SiO_4 - SrAl_2O_4 - BaAl_2O_4 - Sr_2SiO_4$  системи  $SrO - BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  в інтервалі температур 300...875 К (а), в інтервалі температур 875...1700 К (б)

Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції (4) наведена на рис. 7, з якого видно, що в інтервалі температур 300...1700 К фаза  $SrAl_2O_4$  реагує з  $BaSiO_3$ . Стабільною є комбінація фаз  $Sr_2Al_2SiO_7 + BaAl_2O_4$ .

При цьому область системи  $SrAl_2O_4 - BaSiO_3 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaAl_2O_4$  також розбивається на два елементарні трикутники (рис. 8):  $SrAl_2O_4 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaAl_2O_4$  і  $BaSiO_3 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaAl_2O_4$ .

Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції (5) наведена на рис. 9. Відзначено, що в інтервалі температур 300–1700 К фаза  $SrSiO_3$  реагує з  $BaAl_2O_4$ . Стабільною є комбінація фаз  $Sr_2Al_2SiO_7 - BaSiO_3$ . При цьому область системи  $SrSiO_3 - BaAl_2O_4 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaSiO_3$  розбивається на 2 елементарні трикутники (рис. 10):  $SrSiO_3 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaSiO_3$  та  $BaAl_2O_4 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaSiO_3$ . Таким чином,

термодинамічний аналіз можливих обмінних реакцій в системі SrO – BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> показав імовірність протікання п'яти реакцій типу aA + bB = cC + dD.

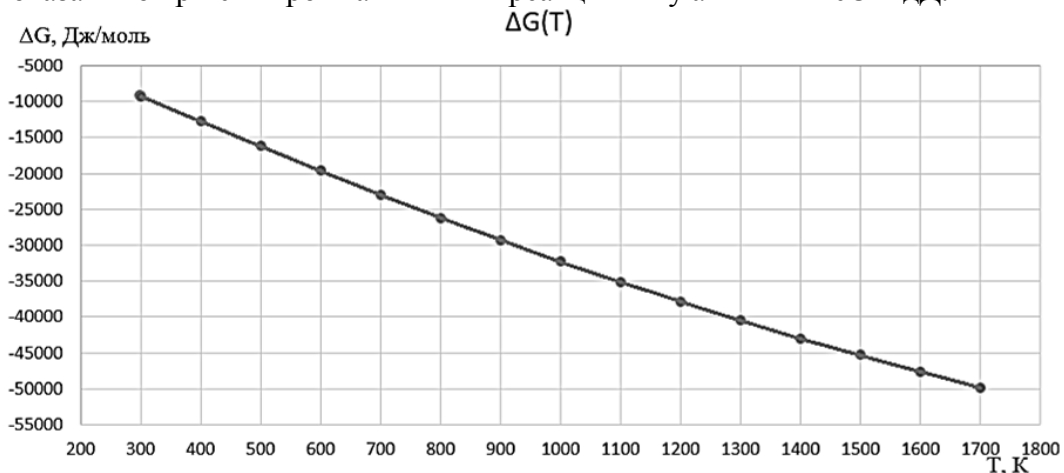


Рисунок 7 – Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції  $2\text{SrAl}_2\text{O}_4 + \text{BaSiO}_3 = \text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + \text{BaAl}_2\text{O}_4$

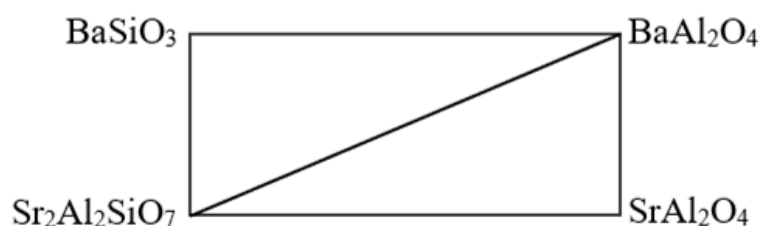


Рисунок 8 – Елементарні трикутники області  $\text{SrAl}_2\text{O}_4 + \text{BaSiO}_3 = \text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + \text{BaAl}_2\text{O}_4$  системи SrO – BaO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> в інтервалі температур 300...1700 К

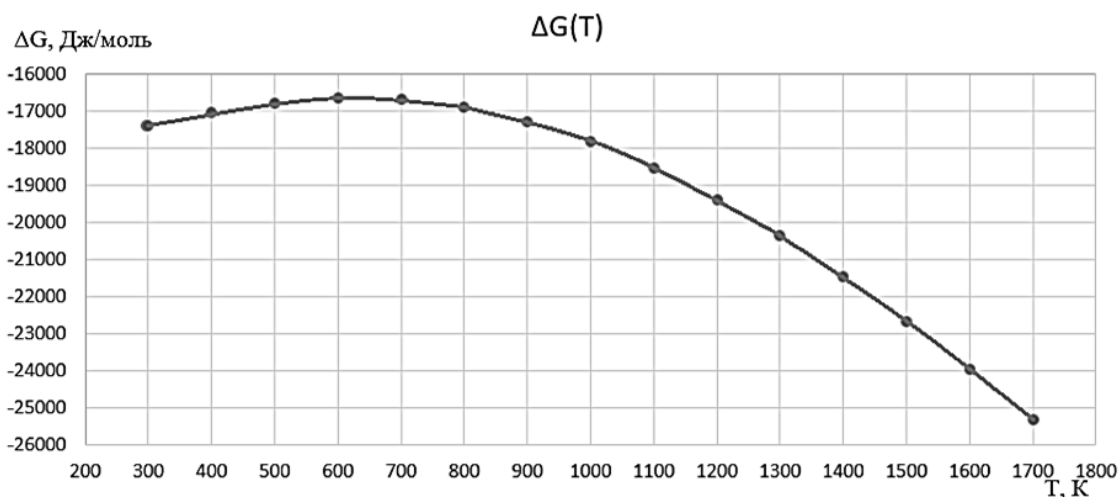


Рисунок 9 – Залежність вільної енергії Гіббса від температури для реакції  $2\text{SrSiO}_3 + \text{BaAl}_2\text{O}_4 = \text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7 + \text{BaSiO}_3$

В інтервалі температур 300...1700 К встановлено існування наступних конод:  $BaAl_2Si_2O_8 - SrAl_2O_4$ ,  $Sr_3Al_2O_6 - Ba_2SiO_4$ ,  $BaAl_2Si_2O_8 - Sr_2SiO_4$ . В інтервалі 300...800 К фаза  $BaAl_2Si_2O_8$  реагує з  $Sr_2SiO_4$  з утворенням комбінації фаз  $Sr_2Al_2SiO_7 - 2SrSiO_3 - BaSiO_3$  («заповнений трикутник»). Підтверджено існування комбінації фаз  $Sr_2Al_2SiO_7 - 2SrSiO_3 - BaSiO_3$  («заповнений трикутник») в інтервалі температур 300...1700 К.

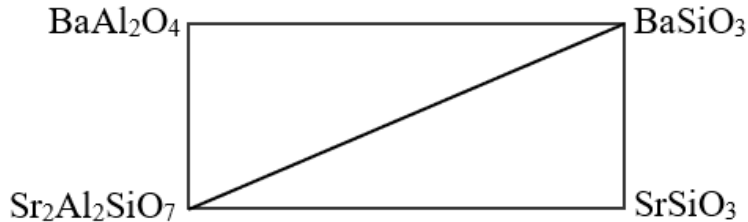


Рисунок 10 – Елементарні трикутники області  $SrSiO_3 - BaAl_2O_4 - Sr_2Al_2SiO_7 - BaSiO_3$  системи  $SrO - BaO - Al_2O_3 - SiO_2$  в інтервалі температур 300...1700 К

Розрахунки також підтверджують, що до  $T = 1200$  К  $Ba_2SiO_4$  не реагує з  $SrAl_2Si_2O_8$ , а в інтервалі температур 1200...1700 К реакція термодинамічно можлива з утворенням комбінації фаз  $BaSiO_3 - BaAl_2O_4 - Sr_2Al_2SiO_7$  («заповнений контур»). Наведені дані слід враховувати в подальшому при розгляді субсолідусної будови системи  $SrO - BaO - Al_2O_3 - SiO_2$ .

**Висновки.** За результатами проведених теоретичних досліджень встановлено, що в багатокомпонентній системі  $SrO-BaO-Al_2O_3-SiO_2$  існує можливість протікання п'яти реакцій типу  $aA+bB = cC+dD$ . В свою чергу в інтервалі температур 300...1700 К встановлено існування наступних конод:  $BaAl_2Si_2O_8 - SrAl_2O_4$  та  $Sr_3Al_2O_6 - Ba_2SiO_4$ . Виявлено, що в температурному інтервалі 800...1700 К присутня конода  $BaAl_2Si_2O_8 - Sr_2SiO_4$ , при цьому в межах 300...800 К фаза  $BaAl_2Si_2O_8$  реагує з фазою  $Sr_2SiO_4$  з утворенням комбінації фаз «заповнений трикутник» –  $Sr_2Al_2SiO_7-2SrSiO_3-BaSiO_3$ .

За даними термодинамічних розрахунків підтверджено, що за температури нижче 1200 К фаза  $Ba_2SiO_4$  не реагує з фазою  $SrAl_2Si_2O_8$ , однак в температурному інтервалі 1200...1700 К реакція стає термодинамічно можливою та утворює комбінацію фаз «заповнений контур» –  $BaSiO_3 - BaAl_2O_4 - Sr_2Al_2SiO_7$ .

Отримані нові дані щодо протікання реакцій обміну в системі  $SrO-BaO-Al_2O_3-SiO_2$  стануть підґрунтям для подальшого вивчення її субсолідусної будови.

**Подяка.** Дослідження здійснювались за рахунок грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проекту 2023.04/0117 «Технологія виготовлення керамічних радіопрозорих вікон для антенно-хвильових систем сучасної радіоактивної ракетної техніки».

#### Література

1. Radio-transparent ceramic materials of spodumene cordierite composition / Zaichuk A.V., Amelina A.A., Karasik Y.V., Khomenko Y.S., Lementareva V.A., Saltykov D.Yu. // Functional Materials. – 2019. – Vol. 26. – No. 1. – P. 174–181.

2. Quartz ceramics modified by nanodispersed silica additive / Khomenko E.S., Zaichuk A.V., Karasik E.V., Kunitsa A.A. // *Funct. Mater.* – 2018. – Vol. 25. – No. 3. – P. 613–618.
3. Pressureless sintering of high performance silicon nitride ceramics at 1620 °C / Chunxi L., Yaxiang Z., Tengfei D. // *Ceramics International.* – 2021. – Vol. 47. – Iss. 20. – P. 29371–29378.
4. Solid state reaction synthesis of Ba<sub>0.75</sub>Sr<sub>0.25</sub>AlSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic composites from mechanically activated precursor mixtures / Ramos-ramírez M.V., López-cuevas J., Rodríguez-galicia J.L., Rendón-angeles J.C. // *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 2014. – Vol. 53 (3). – P. 121–132.
5. Sebastian M.T., Ubc R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties // *International Materials Reviews.* – 2015. – Vol. 60. – No. 7. – P. 392–412.
6. Bansal N.P. Handbook of ceramic composites. Springer, 2004. – 564 p.
7. Electrodynamic characteristics of ceramics based on SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system in microwave range / Grygoruk V.I., Oliynyk V.V., Launets V.L., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Karputin B.A. // *Journal of Nano- and Electronic Physics.* – 2017. – Vol.9. – No. 5. – Art. No. 05014.
8. Дослідження впливу технологічних параметрів на властивості цельзіан-славсонітової кераміки / Пітак Я.М., Лісачук Г.В., Кривобок Р.В., Захаров А.В., Волощук В.В., Чефранов Є.В., Майстат М.С. // *Наукові дослідження з вогнетривів та технічної кераміки. Збірник наукових праць.* – 2019. – № 119. – С. 82–88.
9. Науково-технічні підходи до вирішення актуальних проблем розбудови сектору безпеки і оборони: колективна монографія / за заг. ред. проф. А.П. Марченка. – Одеса: Видавничий дім «Гельветика». – 2021. – 324 с.
10. Theoretical prerequisites for creation of radio transparent ceramic materials based on the system BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> / G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, E.V. Chefranov, V.V. Voloshchuk // *Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences: Collective monograph.* – Riga, Latvia: “Baltija Publishing”. – 2021. – Vol. 2. – P. 282–318.
11. Спряжені реакції в багатокомпонентній системі SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> -SiO<sub>2</sub> / Кривобок Р.В., Пітак Я.М., Лісачук Г.В., Волощук В.В., Гребенюк О.О., Кудій М.О., Баглай В.Ю. // *Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii.* – 2024. – No. 5. – P. 138–145.
12. Бережний А.С. Фізико-хімічні системи тугоплавких, неметалічних і силікатних матеріалів: Навчальний посібник / А.С. Бережний, Я.М. Пітак, О.Д. Пономаренко, Н.П. Соболев. – К.: НМК ВО, 1992. – 172 с.
13. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: A review / Taylor Kenion, Ni Yang, Chengying Xu // *Journal of the European Ceramic Society.* – 2022. – Vol.42. – № 1. – P. 1–17.
14. High temperature ceramic radomes (HTCR) – A review / Abanti Nag, R. Ramachandra Rao, P.K. Panda. // *Ceramics International.* – 2021. – Vol. 47. – № 15. – P. 20793–20806.
15. Adarsh Shukla. Development of a critically evaluated thermodynamic database for the systems containing alkaline-earth oxides. – Montreal. – 2012. – 349 p.
16. Хімічна технологія тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів у прикладах і задачах: навч. посіб.: у 2 ч. / НТУ «ХПІ». Харків: «Підручник НТУ «ХПІ»», 2015. Ч. 2: Фізико-хімічні системи, фазові рівноваги, термодинаміка, ресурсо- та енергозбереження в технології ТНСМ / за ред. М.І. Рищенко. – 336 с.

17. Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosian O.P. Thermodynamics of silicates / translate B.N. Frenkel, V.A. Terentyev. Springer Berlin Heidelberg. – 2011. – 459 p.
18. Thermodynamic analysis of solid phase reactions in SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> system / Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Fedorenko E.Y., Zakharov A.V., Prytkina M.S. // Functional Materials. – 2016. – Vol. 23. – No 1. – P. 71–74.
19. Чефранов Є.В. Радіопрозорі керамічні матеріали на основі системи BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>: дис. ...канд. техн. наук. Харків, 2020. – 199 с.

Bibliography (transliterated)

1. Radio-transparent ceramic materials of spodumene cordierite composition / Zaichuk A.V., Amelina A.A., Karasik Y.V., Khomenko Y.S., Lementareva V.A., Saltykov D.Yu. // Functional Materials. – 2019. – Vol. 26. – No. 1. – P. 174–181.
2. Quartz ceramics modified by nanodispersed silica additive / Khomenko E.S., Zaichuk A.V., Karasik E.V., Kunitsa A.A. // Funct. Mater. – 2018. – Vol. 25. – No. 3. – P. 613–618.
3. Pressureless sintering of high performance silicon nitride ceramics at 1620 °C / Chunxi L., Yaxiang Z., Tengfei D. // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – Iss. 20. – P. 29371–29378.
4. Solid state reaction synthesis of Ba<sub>0.75</sub>Sr<sub>0.25</sub>AlSi<sub>2</sub>O<sub>8</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic composites from mechanically activated precursor mixtures / Ramos-ramírez M.V., López-cuevas J., Rodríguez-galicia J.L., Rendón-angeles J.C. // Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2014. – Vol. 53 (3). – P. 121–132.
5. Sebastian M.T., Ubic R., Jantunen H. Low-loss dielectric ceramic materials and their properties // International Materials Reviews. 2015. – Vol.60. – No. 7. – P. 392–412.
6. Bansal N.P. Handbook of ceramic composites. Springer, 2004. – 564 p.
7. Electrodynamic characteristics of ceramics based on SrO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system in microwave range / Grygoruk V.I., Oliynyk V.V., Launets V.L., Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Karputin B.A. // Journal of Nano- and Electronic Physics. – 2017. – Vol.9. – No. 5. – Art. No. 05014.
8. Doslidzhennia vplyvu tekhnolohichnykh parametriv na vlastyivosti tselzian-slavsonitovoi keramiky / Pitak Ya.M., Lisachuk H.V., Kryvobok R.V., Zakharov A.V., Voloshchuk V.V., Chefranov Ye.V., Maistat M.S. // Naukovi doslidzhennia z vohnetryviv ta tekhnichnoi keramiky. Zbirnyk naukovykh prats. – 2019. – № 119. – P. 82–88.
9. Naukovo-tekhnichni pidkhody do vyrishennia aktualnykh problem rozbudovy sektoru bezpeky i oborony: kolektyvna monohrafiia / za zah. red. prof. A.P. Marchenka. – Odesa: Vydavnychiy dim «Helvetyka». – 2021. – 324 p.
10. Theoretical prerequisites for creation of radio transparent ceramic materials based on the system BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> / G.V. Lisachuk, R.V. Kryvobok, E.V. Chefranov, V.V. Voloshchuk // Achievements of Ukraine and the EU in ecology, biology, chemistry, geography and agricultural sciences: Collective monograph. – Riga, Latvia: “Baltija Publishing”. – 2021. – Vol. 2. – P. 282–318.
11. Сприязнені реакції в багатокomпонентній системі SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> / Kryvobok R.V., Pitak Ya.M., Lisachuk H.V., Voloshchuk V.V., Hrebenuk O.O., Kudii M.O., Bahlai V.Iu. // Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. – 2024. – No. 5. – P. 138–145.
12. Bereznyi A.S. Fyzyko-khimichni systemy tuhoplavkykh, nemetalichnykh i sylikatnykh materialiv:Navchalnyi posibnyk / A.S. Bereznyi, Ya.M. Pitak, O.D. Ponomarenko, N.P. Sobol. – K.:NMK VO, 1992. – 172 p.



13. Dielectric and mechanical properties of hypersonic radome materials and metamaterial design: A review / Taylor Kenion, Ni Yang, Chengying Xu // Journal of the European Ceramic Society. – 2022. – Vol.42. – № 1. – P. 1–17.

14. High temperature ceramic radomes (HTCR) – A review / Abanti Nag, R. Ramachandra Rao, P.K. Panda. // Ceramics International. – 2021. – Vol. 47. – № 15. – P. 20793–20806.

15. Adarsh Shukla. Development of a critically evaluated thermodynamic database for the systems containing alkaline-earth oxides. – Montreal. – 2012. – 349 p.

16. Khimichna tekhnolohiia tuhoplavkykh nemetalevykh i sylikatnykh materialiv u prykladakh i zadachakh: navch. posib.: u 2 ch. / NTU «KhPI». Kharkiv: «Pidruchnyk NTU «KhPI»», 2015. Ch. 2: Fyzyko-khimichni systemy, fazovi rivnovahy, termodynamika, resurso-ta enerhozberzhennia v tekhnolohii TNSM / za red. M.I. Ryshchenka. – 336 p.

17. Babushkin V.I., Matveev G.M., Mchedlov-Petrosian O.P. Thermodynamics of silicates / translate B.N. Frenkel, V.A. Terentyev. Springer Berlin Heidelberg. – 2011. – 459 p.

18. Thermodynamic analysis of solid phase reactions in SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub> system / Lisachuk G.V., Kryvobok R.V., Fedorenko E.Y., Zakharov A.V., Prytkina M.S. // Functional Materials. – 2016. – Vol. 23. – No 1. – P. 71–74.

19. Chefranov Ye.V. Radioprozori keramichni materialy na osnovi systemy BaO – SrO – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – SiO<sub>2</sub>: dys. ...kand. tekhn. nauk. Kharkiv, 2020. 199 p.

УДК 666.651

Р. В. Кривобок, к. техн. н., доцент, Я. М. Пітак, д. техн. н., професор,  
О. Ю. Федоренко, д. техн. н., професор, В. В. Волощук, д-р філософії,  
Є. В. Чефранов, д-р філософії, О. О. Гребенюк, аспірант, О. Р. Тимченко, аспірант

### ВИВЧЕННЯ РЕАКЦІЙ ОБМІНУ В СИСТЕМІ SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>

Наукові дослідження в області нанотехнологій та композитних матеріалів для авіаційної та космічної техніки сприяють створенню нових видів радіопрозорих матеріалів з поліпшеними властивостями. Потреба в цих матеріалах особливо зростає в умовах підвищеної температури, високої швидкості та агресивного зовнішнього середовища, де традиційні полімерні або композитні матеріали не можуть забезпечити необхідного рівня показників ключових властивостей. Керамічні матеріали, виготовлені на основі цільових фаз системи SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>, мають низькі показники діелектричних властивостей та є доволі перспективними для застосування в різних сферах, де важлива висока прозорість для електромагнітних хвиль з мінімальними втратами. У зв'язку з цим є актуальним більш детальне вивчення її субсолідусної будови. В даній статті розглянуто питання протікання реакцій обміну типу  $aA+bB = cC+dD$  в об'ємі концентраційного тетраедра SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>. В роботі приведено результати розрахунків вільної енергії Гіббса для реакцій обміну в розглянутій системі. Зазначено інтервали температур для існування окремих комбінацій фаз та графічно представлено утворені елементарні трикутники. За результатами здійснених теоретичних досліджень встановлено, що в системі SrO-BaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> існує можливість протікання п'яти реакцій обміну типу  $aA+bB = cC+dD$ . Виявлено, що в температурному інтервалі 300...1700 К присутні коноди BaAl<sub>2</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>8</sub> – SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> та Sr<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub> – Ba<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Підтверджена наявність комбінації фаз «заповнений трикутник» – Sr<sub>2</sub>Al<sub>2</sub>SiO<sub>7</sub>-2SrSiO<sub>3</sub>-BaSiO<sub>3</sub> у температурному інтервалі 300...800 К, а також

встановлено існування комбінації фаз «заповнений контур» –  $\text{BaSiO}_3$  –  $\text{BaAl}_2\text{O}_4$  –  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  у температурному інтервалі 1200...1700 К. Виявлення даної комбінації фаз дає можливість розширити існуючу область в дослідній системі для створення високотемпературних керамічних матеріалів. В свою чергу, за отриманими даними термодинамічних розрахунків встановлено, що за температури нижче 1200 К цільові фази розглянутої системи  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4$  та  $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  між собою не взаємодіють, а реакція є термодинамічно невигідною.

**Ключові слова:** цельзіан, славсоніт, тверді розчини, реакції обміну, термодинаміка, ентальпія, ентропія, вільна енергія Гіббса.

R. V. Kryvobok, Ya. M. Pitak, O. Yu. Fedorenko, V. V. Voloshchuk, E. V. Chefranov,  
O. O. Hrebeniuk, O. R. Tymchenko

### **STUDY OF EXCHANGE REACTIONS IN THE SrO-BaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ SYSTEM**

Scientific research in the field of nanotechnology and composite materials for aviation and space technology contributes to the creation of new types of radio-transparent materials with improved properties. The need for these materials is especially growing in conditions of high temperature, high speed and aggressive external environment, where traditional polymer or composite materials cannot provide the necessary level of key properties. Ceramic materials made on the basis of target phases of the SrO-BaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  system have low dielectric properties and are quite promising for use in various fields where high transparency for electromagnetic waves with minimal losses is important. In this regard, a more detailed study of its subsolidus structure is relevant. This article deals with the flow of exchange reactions of the type  $aA+bB = cC+dD$  in the volume of the SrO-BaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  concentration tetrahedron. The paper presents the results of Gibbs free energy calculations for exchange reactions in the considered system. The temperature intervals for the existence of separate combinations of phases are indicated and the formed elementary triangles are graphically presented. Based on the results of theoretical studies, it was established that in the SrO-BaO- $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  system there is a possibility of five exchange reactions of the type  $aA+bB = cC+dD$ . It was found that  $\text{BaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  –  $\text{SrAl}_2\text{O}_4$  and  $\text{Sr}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  –  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4$  anodes are present in the temperature range of 300...1700 K. The presence of a combination of "filled triangle" phases –  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ - $2\text{SrSiO}_3$ - $\text{BaSiO}_3$  in the temperature range of 300...800 K was confirmed, and the existence of a combination of "filled circuit" phases –  $\text{BaSiO}_3$  –  $\text{BaAl}_2\text{O}_4$  –  $\text{Sr}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$  in the temperature range of 1200...1700 K was confirmed. The discovery of this combination of phases makes it possible to expand the existing area in the experimental system for creating high-temperature ceramic materials. In turn, according to the obtained data of thermodynamic calculations, it was established that at temperatures below 1200 K, the target phases of the considered system,  $\text{Ba}_2\text{SiO}_4$  and  $\text{SrAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ , do not interact with each other, and the reaction is thermodynamically disadvantageous.

**Keywords:** celsian, slawsonite, solid solutions, exchange reactions, thermodynamics, enthalpy, entropy, Gibbs free energy.

О. О. Алексахін<sup>1</sup>, к. техн. н., доцент, О. В. Круглякова<sup>2</sup>, к. техн. н., доцент,  
О. В. Бобловський<sup>3</sup>, асистент, Л. І. Тютюник<sup>2</sup>, к. техн. н., доцент

## ПАРАМЕТРИ ТЕПЛООБМІННИКІВ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ УТЕПЛЕНИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ОДНОСТУПІНЧАСТІЙ СХЕМІ ПРИЄДНАННЯ

<sup>1</sup>Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, м. Харків

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
м. Харків

<sup>3</sup>Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,  
м. Харків

**Ключові слова:** централізоване тепlopостачання; реформування систем тепlopостачання; індивідуальний тепловий пункт; підігрівники гарячої води; одноступінчаста схема приєднання теплообмінників; площа поверхні теплопередачі, витрати мережної води для гарячого водопостачання.

Однією з особливостей утвореної за останні десятиріччя системи централізованого тепlopостачання міст України є наявність у житлових мікрорайонах центрів управління тепловими і гідравлічними режимами, якими є теплорозподільні станції (ТРС). Для забезпечення потреб централізованого гарячого водопостачання споживачів мікрорайону у технологічній схемі ТРС передбачено встановлення потужних підігрівних установок. При такій схемі тепlopостачання розподільні теплові мережі є чотиритрубними, що обумовлює суттєві втрати теплоти мікрорайонними теплопроводами. Як один із можливих заходів зменшення втрат при транспортуванні теплової енергії розподільними теплопроводами є перенесення теплообмінників гарячого водопостачання в індивідуальні теплові пункти (ІТП) будівель, що дозволить перейти до двотрубної розподільної теплової мережі. Особливості такого переходу розглянуто, наприклад, у роботах [1, 2].

При «зв'язаній» подачі тепла отримана системою опалення кількість теплоти залежить від витрат теплоти системою гарячого водопостачання. Це обумовлено обмеженням загальної кількості теплоти, яка надходить до мікрорайону, з розрахунку годинних витрат теплоти на опалення і середніх за добу теплових витрат на гаряче водопостачання. При цьому надходження теплоти до системи гарячого водопостачання не обмежується [3]. Як наслідок, будь-яке відхилення витрат теплоти на гаряче водопостачання від середнього значення обумовлює зміну подачі теплоти до системи опалення і відповідну зміну температури повітря всередині опалювальних приміщень. Тому вибір схеми приєднання теплообмінних апаратів гарячого водопостачання рекомендовано [4, 5] здійснювати залежно від співвідношення максимальних витрат теплоти на гаряче водопостачання та опалення  $\gamma_{\max} = Q_{h,\max}/Q_{o,\max}$ . Приєднання теплообмінників за одноступінчастою послідовною схемою (рис. 1, а) доцільне при значеннях  $\gamma_{\max} < 0,15$ . При значеннях  $\gamma_{\max} > 1$  доцільне використання одноступінчастої паралельної схеми (рис. 1, б).

Підвищення опору теплопередачі будівельних конструкцій при «утепленні» функціонуючих будівель з метою зменшення енергоспоживання обумовлює необхідність

приведення відпуску теплоти до системи опалення у відповідність зменшеним втратам теплоти приміщеннями. Це доцільно здійснювати зниженням температури теплоносія на вході до системи опалення, що в умовах «зв’язаної» подачі теплоти впливатиме на показники роботи теплообмінних апаратів гарячого водопостачання, встановлених на ІТП будівель.

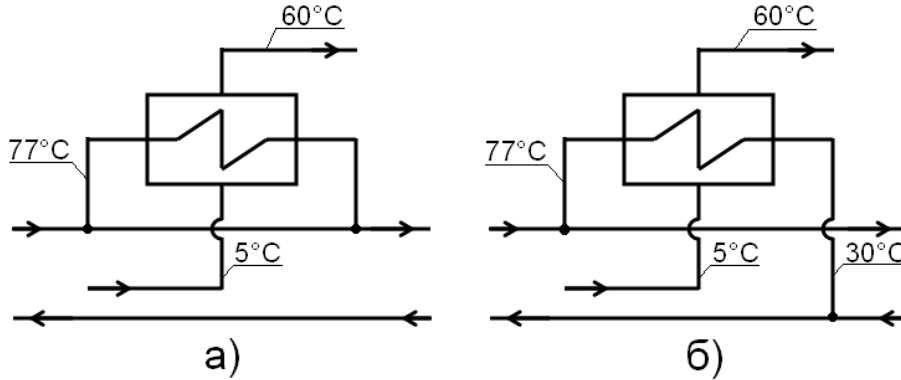


Рисунок 1 – Одноступінчасті схеми приєднання водопідігрівників до закритих теплових мереж: а – послідовна; б – паралельна

Метою роботи є оцінка витрат мережної води і площі поверхні теплообміну підігрівників гарячої води при застосуванні на ІТП утепленої будівлі одноступінчастої паралельної схеми приєднання.

Значення температури мережної води на вході ( $\tau_{3,н}$ ) й виході ( $\tau_{2,н}$ ) системи опалення утепленої будівлі можна визначити за наведеними у роботі [6] співвідношеннями

$$\tau_{3,н} = [0,5(\tau_3 + \tau_2)](\mu \bar{Q}_0)^{0,8} + 0,5(\tau_3 - \tau_2)\mu \bar{Q}_0 + t_{вн}, \tag{1}$$

$$\tau_{2,н} = \tau_{3,н} - (\tau_3 - \tau_2)\mu \bar{Q}_0, \tag{2}$$

де  $t_{вн}$  – температура внутрішнього повітря у приміщеннях [7];  $\tau_3, \tau_2$  – температура мережної води на вході й виході системи опалення будівлі до утеплення відповідно;  $\bar{Q}_0 = (t_{вн} - t_n)/(t_{вн} - t_{p,o})$  – відносне опалювальне навантаження будівлі;  $t_n$  – поточна температура зовнішнього повітря;  $t_{p,o}$  – розрахункова для опалення температура зовнішнього повітря для кліматичних умов конкретної місцевості [8].

Коефіцієнт  $\mu$  дорівнює відношенню витрат теплоти на опалення утепленої будівлі при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря у конкретній місцевості  $Q_{o,н}$  до витрат теплоти на опалення будівлі до її утеплення при тій самій температурі зовнішнього повітря  $Q_{o,р}$ .

$$\mu = \frac{Q_{o,н}}{Q_{o,р}}. \tag{3}$$

Витрати води з мікрорайонної теплової мережі для опалення будівлі визначено при умові, що систему опалення приєднано до мережі за незалежною схемою за допомогою теплообмінного апарату. В такому разі формула для відносних витрат мережної

води для опалення має вигляд [6]

$$\beta = \frac{G(\mu)}{G(\mu=1)} = \frac{\mu[\tau_{1,p} - (\tau_{2,p} + \Delta)]}{\tau_{1,p,n} - (\tau_{2,p,n} + \Delta)}, \quad (4)$$

де  $G(\mu)$ ,  $G(\mu=1)$  – витрати мережної води для опалення будівлі після і до утеплення будівлі відповідно;  $\tau_{1,p}$ ,  $\tau_{2,p}$  – температура мережної води у подавальному трубопроводі теплових мереж й на виході системи опалення неутепленої будівлі при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря;  $\tau_{1,p,n}$ ,  $\tau_{2,p,n}$  – те ж саме після утеплення будівлі;  $\Delta$  – недогрів води в опалювальному теплообмінному апараті.

Тепловий еквівалент витрат мережної води через ІТП при одноступінчастій паралельній схемі приєднання підігрівників гарячої води дорівнює сумі теплових еквівалентів витрат через систему опалення і теплообмінники системи гарячого водопостачання

$$W_{\text{одн}} = cG_{\text{одн}} = \frac{Q_{o,n,\max}}{\tau_{3,p,n} - \tau_{2,p,n}} + \frac{Q_{h,\max}}{\tau'_{1,n} - \tau'_{2,n}}, \quad (5)$$

де  $G_{\text{одн}}$  – витрати мережної води;  $Q_{o,n,\max}$  – витрати теплоти для опалення утепленої будівлі при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря;  $Q_{h,\max}$  – максимальні витрати теплоти для гарячого водопостачання споруди;  $\tau_{3,p,n}$  – температура мережної води на вході системи опалення утепленої будівлі при розрахунковій для опалення температурі зовнішнього повітря;  $\tau'_{1,n}$ ,  $\tau'_{2,n}$  – температура мережної води на вході системи опалення температурі зовнішнього повітря у точці зламу температурного графіка;  $c$  – питома теплоємність мережної води.

Величина охолодження мережної води в системі опалення утепленої ( $\tau_{3,p,n} - \tau_{2,p,n}$ ) і неутепленої будівлі ( $\tau_{3,p} - \tau_{2,p}$ ) пов'язані між собою співвідношенням [6]

$$\tau_{3,p,n} - \tau_{2,p,n} = \mu(\tau_{3,p} - \tau_{2,p}). \quad (6)$$

Наведені вище формули отримано при умові, що витрати води через систему опалення будівлі до утеплення і після незмінні. Графік зміни температури мережної води залежно від коефіцієнта ефективності утеплення будівлі  $\mu$  та величини відносного опалювального навантаження  $\bar{Q}_o$  подано на рис. 2.

При аналізі характеристик теплообмінних апаратів максимальну ефективність утеплення будівель прийнято рівною 35 % ( $\mu = 0,65$ ). Обчислення проведено для таких значень температури води, що нагрівається [9, 10]:  $t_x = 5$  °С (холодна водопровідна вода),  $t_r = 55$  °С (гаряча вода). Розрахункову температуру мережної води для гарячого водопостачання прийнято за параметрами точки зламу температурного графіка ( $\bar{Q}_o = 0,35$ ). Розрахункові температури мережної води для системи опалення будівель до утеплення прийнято рівними  $\tau_{1,p} = 95$  °С (подавальний трубопровід),  $\tau_{2,p} = 70$  °С (зворотний трубопровід). Площу поверхні теплопередачі теплообмінного апарату визначено з рівняння теплопередачі [11, 12] залежно від величини розрахункового теплового навантаження апарату  $Q_a$ ; коефіцієнта теплопередачі  $k_p$ ; середньої логарифмічної різниці те-

мператур середовищ у теплообміннику  $\Delta\bar{t}_a$

$$F = \frac{Q_a}{k_p \Delta\bar{t}_a} \tag{7}$$

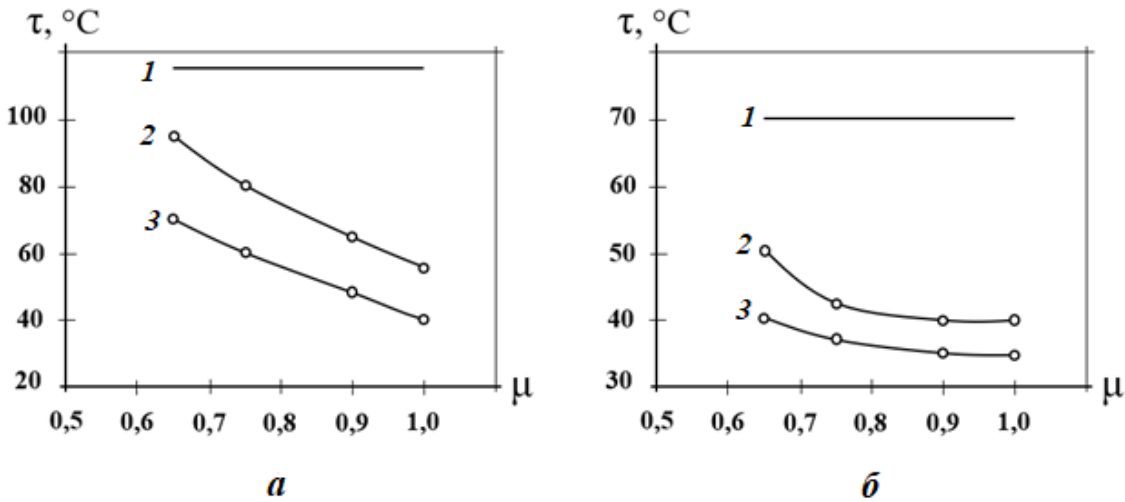


Рисунок 2 – Температура мережної води:

*a* – при  $\bar{Q}_0 = 1$ ; *б* – при  $\bar{Q}_0 = 0,35$ ; 1 – подавальний трубопровід розподільної теплової мережі; 2 – на вході до системи опалення; 3 – на виході з системи опалення

У схемах індивідуальних теплових пунктів, як правило, використовують пластинчасті теплообмінні апарати. З урахуванням термічного опору відкладень на пластинах апаратів коефіцієнти теплопередачі змінюються у діапазоні  $1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C}) \pm 7\%$ . У подальших обчисленнях величину коефіцієнта теплопередачі для теплообмінників гарячого водопостачання прийнято рівною  $1600 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°C})$  [13]. При визначенні середньої логарифмічної різниці температур речовин у теплообміннику температуру мережної води на вході до підігрівника гарячої води прийнято рівною температурі у подавальному трубопроводі розподільної теплової мережі, на виході з підігрівника – рівною температурі мережної води після системи опалення. Зміну витрат мережної води через індивідуальний тепловий пункт і площі поверхні теплопередачі теплообмінників гарячого водопостачання подано на рис. 3.

Залежно від співвідношення максимальних теплових навантажень  $\gamma_{\text{max}}$  підвищення ефективності утеплення будівлі обумовлює зменшення витрат мережної води орієнтовно на 30–37%. При розглянутому у роботі способі зменшення подачі теплової енергії до системи опалення утепленої будівлі при зменшенні коефіцієнта  $\mu$  слід очікувати збільшення потрібної площі поверхні підігрівників гарячої води. Вказане збільшення становить приблизно 12% при  $\mu = 0,65$  і приблизно 9% при  $\mu = 0,75$ .

Результати обчислень узагальнені рівняннями для величин теплового еквівалента витрат мережної води  $W_{\text{одн}} = cG_{\text{одн}}$  і площі поверхні теплопередачі теплообмінників гарячого водопостачання  $F_{\text{одн}}$

$$W_{\text{одн}} = [0,016\gamma_{\text{max}} + \mu(0,0186\gamma_{\text{max}} + 0,034) - 0,0123] Q_{0,\text{max}}, \tag{8}$$

$$F_{\text{одн}} = (3,46 - 0,89\mu)10^{-5} Q_{h,\text{max}} \cdot \quad (9)$$

Величина  $Q_{o,\text{max}}$  (Вт) характеризує опалювальне навантаження будівлі до її утеплення. Похибка апроксимації результатів обчислень формулами (8), (9) не перевищує 3 %. Запропоновані співвідношення можуть бути корисними при порівнянні схем приєднання підігрівників гарячої води до теплових мереж.

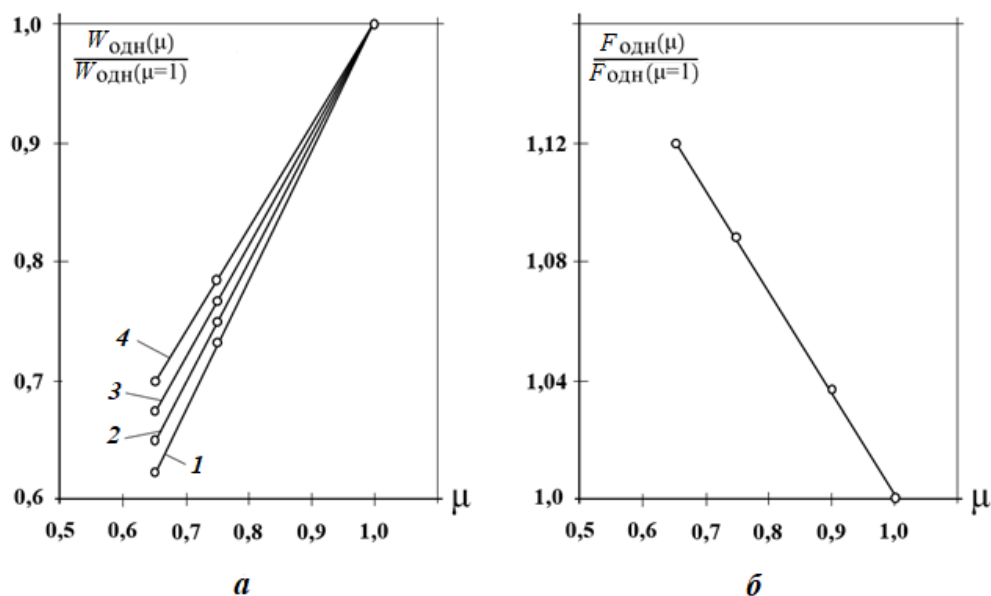


Рисунок 3 – Вплив ефективності утеплення будівлі на витрати мережної води через ІТП (а) і площу поверхні теплопередачі підігрівників гарячої води (б)

$1 - \gamma_{\text{max}} = 0,6; 2 - 0,8; 3 - 1,0; 4 - \gamma_{\text{max}} = 1,2$

### Висновки

1. Проведено оцінки зміни показників підігрівників гарячого водопостачання, що встановлені на індивідуальних теплових пунктах (ІТП) утеплених житлових будинків за одноступінчастою схемою.

2. Показано, що утеплення будівель обумовлює зменшення витрат мережної води орієнтовно на третину і необхідність збільшення площі теплопередачі підігрівників гарячого водопостачання приблизно на 9–12 %.

3. Результати обчислень узагальнено формулами для обчислення витрат мережної води і площі поверхні теплопередачі теплообмінних апаратів гарячого водопостачання. Похибка апроксимації результатів обчислень знаходиться у межах 3 %.

4. Отримані формули можуть бути використані при оцінках ефективності схем приєднання підігрівних установок гарячого водопостачання індивідуальних теплових пунктах утеплених будівель.

### Література

1. Алексахін О.О., Бобловський О.В. Теплові і гідравлічні режими мікрорайонних систем в умовах реформування централізованого теплопостачання. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 180 с.

2. Алексахин А.А., Бобловский А.В. К вопросу о переходе на двухтрубные си-

стемы теплоснабження микрорайонів // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. №11(142), 2015. – С. 26-31.

3. Бобух А.О. Автоматизація інженерних систем: Навч. посібн.– Х.: ХНАМГ, 2005. – 212 с.

4. Тарадай А.М. Основы разработки пластинчатых теплообменников для систем теплоснабжения. –Харьков: Основа, 1998. –192 с.

5. Пластинчатые теплообменники в промышленности: Учеб. пособ. / Л.Л. Товажнянский, П.А. Капустенко, Г.Л. Хавин и др.: под общ. ред. Л.Л. Товажнянского;– Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 232 с.

6. Алексахин А.А. Особенности утепления групп зданий при централизованном теплоснабжении / А.А. Алексахин, С.В. Ена, Е.П. Гордиенко, М.В. Сыров, Р.С. Фещенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2018. – №3. – С. 27–34.

7. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016. – Офіційне видання. – К. : Мін-регіон України, 2017.

8. Будівельна кліматологія: ДСТУ НБВ.1.1-27:2010: чинний від 01.11.2011: Мін-регіонбуд, Київ. 2011. – 123 с.

9. Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарські потреби в Україні: керівний технічний матеріал 204 України, 244-94, 195. – 636 с.

10. Алексахін О.О. Теплообмінні апарати в системах тепlopостачання: Навч. посібн. / О.О. Алексахін, А.М. Ганжа, О.В. Круглякова. – Х: «Друкарня Мадрид», 2023. – 249 с.

11. Wong H.Y. Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers. Longman, London and New York, 1977.

12. Драганов Б.Х., Долінський А.А., Міщенко А.В., Письменний Є.М. Теплотехніка. – К.: «ІНКОС» 2005. – 504 с.

13. Алексахін О.О., Бобловський О.В., Круглякова О.В., Чайка Ю.І. Розрахунок підігрівників гарячої води для індивідуальних теплових пунктів з урахуванням зміни температурного графіка розподільної теплової мережі // Комунальне господарство міст: наук.-техн. збірник. – Харків, 2023. – Том 1, вип.175. – С. 26–31.

#### Bibliography (transliterated)

1. Aleksakhin O.O., Boblovskiy O.V. Teplovi i hidravlichni rezhymy mikrorajonnykh system v umovakh reformuvannya tsentralizovanoho teplopstachannia. – Kharkiv: KhNUMH im. O.M. Beketova, 2021. – 180 p.

2. Aleksahin A.A., Boblovskij A.V. K voprosu o perehode na dvuhtrubnye sistemy teplosnabzheniya mikrorajonov // Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. №11(142), 2015. –P. 26–31.

3. Bobukh A.O. Avtomatyzatsiia inzhenernykh system: Navch. posibn.– Kh.: KhNAMH, 2005. – 212 p.

4. Taradai A.M. Osnovi razrabotki plastinchatikh teploobmennikov dlya sistem teplosnabzheniya. –Kharkov: Osnova, 1998. –192 p.

5. Plastinchatye teploobmenniki v promyshlennosti: Ucheb. posob. / L.L. Tovazhnyanskyu, P.A. Kapustenko, G.L. Havin i dr.: pod obsh. red. L.L. Tovazhnyanskogo;– Harkov: NTU «HPI», 2004. – 232 p.

6. Aleksakhin A.A. Osobennosti utepleniya grupp zdaniy pri tsentralizovannom teplosnabzhenii / A.A. Aleksakhin, S.V. Yena, Ye.P. Gordienko, M.V. Sirov,



- R.S. Feshchenko // *Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia*. – 2018. – №3. – P. 27–34.
7. *Teplova izoliatsiia budivel: DBN V.2.6-31:2016*. – Ofitsiine vydannia. – K.: Minrehion Ukrainy, 2017.
  8. *Budivelna klimatolohiia: DSTU NBV.1.1-27:2010: chynnyi vid 01.11.2011: Minrehionbud, Kyiv*. 2011. – 123 p.
  9. Normy ta vказivky po normuvanni vytrat palyva ta teplovoi enerhii na opalennia zhytlovykh ta hromadskykh sporud, a takozh na hospodarski potreby v Ukraini : kerivnyi tekhnichniy material 204 Ukrainy, 244-94, 195. – 636 p.
  10. Aleksakhin O.O. *Teploobminni aparaty v systemakh teplopostachannia: Navch. posibn.* / O. O. Aleksakhin, A.M. Hanzha, O.V. Kruhliakova. – Kh: «Drukarnia Madryd», 2023. – 249 p.
  11. Wong H.Y. *Handbook of Essential Formulae and Data on Heat Transfer for Engineers*. Longman, London and New York, 1977.
  12. Drahanov B.Kh., Dolinskyi A.A., Mishchenko A.V., Pysmennyi Ye.M. *Teplotekhnika*. – K.: «INKOS» 2005. – 504 p.
  13. Aleksakhin O.O., Boblovskiy O.V., Kruhliakova O.V., Chaika Yu.I. *Rozrakhunok pidihrivnykiv hariachoi vody dlia indyvidualnykh teplovykh punktiv z urakhuvanniam zminy temperaturnoho hrafika rozpodilnoi teplovoi merezhi // Komunalne hospodarstvo mist: nauk.–tekhn. zbirnyk*. – Kharkiv, 2023. – Tom 1, vyp.175. – P. 26–31.

УДК 658.264

О. О. Алексахин, О. В. Круглякова, О. В. Бобловський, Л. І. Тютюник

### **ПАРАМЕТРИ ТЕПЛООБМІННИКІВ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ДЛЯ ТЕПЛОВИХ ПУНКТІВ УТЕПЛЕНИХ БУДІВЕЛЬ ПРИ ОДНОСТУПІНЧАСТІЙ СХЕМІ ПРИЄДНАННЯ**

Розглянуто особливості функціонування централізованих систем теплопостачання житлових мікрорайонів при проведенні робіт з «утеплення» існуючих будівель, а саме, показники роботи підігрівних установок гарячого водопостачання. Проаналізовано вплив величини зменшення опалювального навантаження внаслідок проведення робіт з підвищення опору теплопередачі конструкцій будівлі на витрати мережної води і площу теплопередачі теплообмінних апаратів гарячого водопостачання. Оцінки проведено для умов використання одноступінчастої паралельної схеми приєднання теплообмінників до розподільних теплових мереж. При обчисленні площі поверхні теплопередачі використано відомі співвідношення для коефіцієнтів теплообміну для таких найбільш вживаних у системах теплопостачання теплообмінників, якими є пластинчасті апарати. Визначено діапазон зміни площі поверхні теплопередачі підігрівників гарячої води і витрат мережної води залежно від співвідношення максимальних теплових навантажень гарячого водопостачання та опалення будівлі і величини ступеня ефективності утеплення споруди. Запропоновано формули для визначення параметрів теплообмінних апаратів гарячого водопостачання. Формули справедливі у діапазоні зменшення витрат теплоти на опалення внаслідок утеплення будівлі від 0 до 35 %. Оцінку зменшення опалювального навантаження проведено за умови забезпечення при термомодернізації будівлі, що споруджена за нормами, які діяли декілька десятиліть тому, сучасних вимог до величини термічного опору будівельних конструкцій. Температуру води у системі опалення утепленої будівлі визначено залежно від величини ступеня ефективності уте-

плення споруди при умові, що витрати води через систему опалення будівлі до її утеплення і після незмінні. Прийнятий до розгляду діапазон зміни співвідношення теплових навантажень гарячого водопостачання і опалення становить 0,6–1,2.

Отримані результати можуть бути корисними при порівнянні схем приєднання теплообмінних апаратів системи гарячого водопостачання для улаштування індивідуальних теплових пунктів утеплення будівель.

**Ключові слова:** централізоване теплопостачання; реформування систем теплопостачання; індивідуальний тепловий пункт; підігрівники гарячої води; одноступінчаста схема приєднання теплообмінників; площа поверхні теплопередачі, витрати мережної води для гарячого водопостачання.

A. A. Aleksakhyn, O. V. Kruhliakova, A. V. Boblovskyi, L. I. Tiutiunyk

### **PARAMETERS OF HOT WATER SUPPLY HEAT EXCHANGERS FOR HEAT STATIONS OF INSULATED BUILDINGS AT ONE-STAGE CONNECTION SCHEME**

The peculiarities of functioning of centralized heat supply systems of residential microdistricts at carrying out works on ‘insulation’ of buildings in operation, namely, parameters of operation of hot water supply heating units are considered. The influence of the heating load reduction due to the works on increasing the heat transfer resistance of the building structures on the flow rate of network water and heat exchange area of hot water supply heaters has been analyzed. Estimates are made for conditions of use of one-stage parallel scheme connection for heat exchangers to heat distribution networks. The known relations for such most widespread in heat supply systems heat exchangers as plate apparatuses are used at calculations of a heat transfer surface. The range of change of the heat transfer surface of hot water heaters and the flow rate of network water depending on the ratio of the maximum heat loads of hot water supply and heating and the degree of insulation efficiency of the building is determined.

Formulas for determining the parameters of hot water supply heat exchangers are proposed. The formulas are valid in the range of reduction of heat consumption for heating of the building from 0 to 35 %. Assessment of the heating load reduction is performed on condition that the thermal modernization of a building constructed in accordance with the building requirements in force several decades ago provides modern requirements for the thermal resistance of building structures. The temperature of water in the heating system of the insulated building is determined depending on the building insulation efficiency, provided that the water flow rate through the heating system of the building before and after its insulation is unchanged. The range of variation of the ratio of hot water supply and heating heat loads accepted for consideration is 0,6–1,2.

The obtained results can be used at comparison of connection schemes of heat exchangers for hot water heating for installation on individual heat points of insulated buildings.

**Keywords:** district heating; reforming of heat supply systems; individual heat station; hot water heaters; single-stage scheme of heat exchangers connection; heat transfer surface area, flow rate of network water for hot water supply.

В. О. Пінчук, д. техн. н., професор, Т. А. Шарабура, к. техн. н., доцент,  
М. С. Чемеринський, к. техн. н., доцент, С. А. Пінчук, аспірант

## ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро*

**Ключові слова:** вугілля, повітряна газифікація, киснева газифікація, ексергетичний баланс, хімічна ексергія, фізична ексергія, ККД ексергетичної досконалості.

**Вступ.** Впровадження в Україні «зеленої» трансформації промисловості та енергетики шляхом скорочення споживання вугілля та іншого викопного палива, а також проведення реструктуризації вугільної галузі відбувається не так швидко, як передбачалося [1,2]. Така трансформація потребує часу, технологій та інвестицій для її здійснення, що не дає можливості швидкої відмови України від вугілля. Тому, враховуючи зростаючі потреби в створенні та впровадженні високоефективних безвідходних технологій, спрямованих на дотримання екологічних і ресурсозберігаючих норм, питання раціонального використання вугілля як енергоносія стають дуже актуальними.

Для розробки енергозберігаючих технологій і установок, що використовують вугілля, необхідна оцінка енергетичного потенціалу одержуваних продуктів. Крім того, необхідно визначити їх придатність для конкретних технологій, процесів і установок. Адже, поряд з утворенням цільових продуктів виходить значна кількість супутніх, які можуть бути ефективно використані для різних цілей, оскільки їх тепломісткість становить від 20 до 50% від теплоти згоряння вихідного вугілля залежно від способу переробки та характеристик вугілля. Одним із раціональних способів термічної переробки вугілля, окрім традиційного спалювання, є його газифікація [3,4].

**Постановка задачі.** Термодинамічні розрахунки та аналіз теплотехнічних установок звичайно обмежуються складанням і використанням енергетичних балансів, які виражають кількісні характеристики енергоресурсів, на основі яких визначаються такі величини як продуктивність установок, витрати енергоносіїв і т.п. Однак енергетичні баланси мають істотний недолік: вони не враховують якісних розходжень, енергетичну цінність енергоресурсів різної фізичної природи або різного потенціалу та не описують особливостей реальних робочих процесів у зв'язку із проявами необоротності, яка завжди знижує енергетичну ефективність реальних процесів. Тому метод розгляду процесів, що враховує не тільки кількісні, але і якісні особливості енергопотоків і енергоносіїв, істотно уточнює картину енерговикористання в різних установках. Таким методом є ексергетичний аналіз, а відповідні баланси – ексергетичними [5,6]. Складання й використання ексергетичних балансів теплотехнічних установок розширює рамки можливостей аналізу процесів, а важливим прикладним розділом ексергетичного аналізу є термодинамічно об'єктивна оцінка ступеню досконалості різних процесів і установок за допомогою ексергетичного ККД [7,8]. Всі застосування ексергетичного методу опираються на той факт, що для техніки, зокрема енергетики, важлива не енергія взагалі, а ексергія, тобто енергія, що має працездатність. Визначення раціональних шляхів її вироблення, використання, транспортування й збереження в будь-якій технології – це, в остаточному підсумку, ціль будь-якого інженерного аналізу й розрахунку [9,10].

Для ексергетичного аналізу необхідно розрахувати значення ексергії (хімічної та фізичної) на вході та на виході системи, побудувати матеріальні та ексергетичні баланси методів та схем термічної переробки та розрахувати ексергетичні ККД процесів (загальний, хімічний та фізичний) [10,11,12]. За допомогою запропонованих розрахунків можливе визначення раціональних режимів ведення процесу переробки залежно від кінцевих цілей отримуваних продуктів, порівняння ексергетичної досконалості процесів та виявлення найефективніших схем термічної переробки.

**Основна частина.** Досліджено процес газифікації довгополум'яного вугілля наступного складу:  $W=13\%$ ;  $A^p=28\%$ ;  $S^p=3,5\%$ ;  $C^p=75\%$ ;  $H^p=5,5\%$ ;  $N^p=1,6\%$ ;  $O^p=13\%$ ; склад золи:  $SiO_2=52,7\%$ ;  $Al_2O_3=25,7\%$ ;  $Fe_2O_3=14,1\%$ ;  $Ca=2,0\%$ ;  $Mg=0,9\%$ ;  $K_2O=2,6\%$ ;  $Na_2O=1,0\%$ ;  $TiO_2=1,0\%$ .

Дослідження ексергетичних характеристик процесу газифікації вугілля здійснювалося в широкому діапазоні температур, що охоплюють газифікацію в щільних, киплячих шарах і потоці при повітряному й кисневому дутті. Вихід і склад генераторного газу при повітряній та кисневій газифікації наведено в табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Вихід і склад генераторного газу при повітряній газифікації вугілля

Температура процесу, С	Витрата повітря, м <sup>3</sup> /кг	Склад генераторного газу, % об.							Вихід газу, м <sup>3</sup> /кг
		H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	Інші	
1000	1,8	15,4	3,2	0,2	50,4	27,1	3,5	0,2	2,9
1200	2,1	11,3	5,6	0,6	54,3	23,3	4,6	0,3	3,7
1400	2,5	7,6	7,9	0,4	58,3	19,4	6,0	0,4	3,1
1600	3,0	4,3	9,7	0,001	62,6	14,8	7,9	0,7	2,4
1800	3,7	1,9	10,5	0,003	66,8	9,4	10,7	0,7	1,6

Таблиця 2 – Вихід і склад генераторного газу при кисневій газифікації вугілля

Температура процесу, С	Витрата кисню, м <sup>3</sup> /кг	Склад генераторного газу, % об.							Вихід газу, м <sup>3</sup> /кг
		H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> S	N <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	Інші	
1000	0,29	36,9	0,4	0,8	0,4	60,7	0,4	0,4	1,44
1200	0,32	34,4	2,4	1,4	0,4	59,4	1,6	0,4	1,45
1400	0,35	32,1	4,8	1,3	0,4	58,4	2,6	0,4	1,44
1600	0,38	29,1	7,8	0,9	0,5	57,2	3,6	0,9	1,44
1800	0,41	26,1	10,9	0,6	0,5	55,9	4,8	1,2	1,46

Дослідженнями встановлено, що основними продуктами газифікації є генераторний газ і шлаки. Схема газифікації вугілля наведена на рис. 1.

Ексергетичний баланс процесу газифікації, кДж/кг вугілля:

$$E_{в\ x} + E_{в\ \phi} + E_{ок\ x} + E_{ок\ \phi} = E_{г\ x} + E_{г\ \phi} + E_{шл\ x} + E_{шл\ \phi} + \Delta E_{вт}, \quad (1)$$



де  $E_{вх}$  – хімічна ексергія вугілля;  
 $E_{вф}$  – фізична ексергія вугілля;  
 $E_{окх}$  – хімічна ексергія окисника;  
 $E_{окф}$  – фізична ексергія окисника;  
 $E_{ггх}$  – хімічна ексергія генераторного газу;  
 $E_{ггф}$  – фізична ексергія генераторного газу;  
 $E_{шх}$  – хімічна ексергія шлаку;  
 $E_{шф}$  – фізична ексергія шлаку;  
 $\Delta E_{вт}$  – ексергетичні втрати.

Рисунок 1 – Схема газифікації вугілля

Відповідно до методики ексергетичного аналізу [10,11] складені ексергетичні баланси процесу газифікації вугілля при повітряному й кисневому дутті в діапазоні температур від 800 °С до 1800 °С. Приклад матеріального та ексергетичного балансу для газифікації вугілля при температурі 1200 °С наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Матеріальний та ексергетичний баланси процесу газифікації вугілля

Статті балансу	Кількість, кг		Ексергія			
			МДж/кг вугілля		%	
	повітряне дуття	кисневе дуття	повітряне дуття	кисневе дуття	повітряне дуття	кисневе дуття
Прихід						
Вугілля	1		20,35		99,999	
Окисник	2,75	0,5	0,0001		0,001	
Разом	3,75	1,5	20,35		100	
Витрата						
Шлаки	0,24	0,2	0,22		1,1	
Генераторний газ	3,51	1,3	15,06	14,25	74,0	70,0
Ексергетичні втрати	-		5,07	5,88	24,9	28,9
Разом	3,75	1,5	20,35		100	

За результатами дослідження встановлено, що при повітряній та кисневій газифікації ексергію приходу на 99,9 % становить хімічна ексергія вугілля, що перетворюється в ексергію генераторного газу та шлаку.

Структура витратної частини ексергетичного балансу процесу газифікації при повітряному й кисневому дутті представлена на рисунку 2.

Основними компонентами генераторного газу є горючі компоненти CO і H<sub>2</sub>, що обумовлює його високу хімічну ексергію. У зв'язку із цим, генераторний газ можна використовувати як паливо, відновлювач, або як проміжну сировину для наступних перетворень. Вміст горючих компонентів генераторного газу при кисневій газифікації на

59 % більше, ніж при повітряній, але при цьому вихід газу при кисневій газифікації на 2,26 м<sup>3</sup>/кг вугілля менше, ніж при повітряній. Тому збільшення хімічної ексергії генераторного газу, що отримано шляхом кисневої газифікації, усього на 5 % більше, ніж при повітряній.

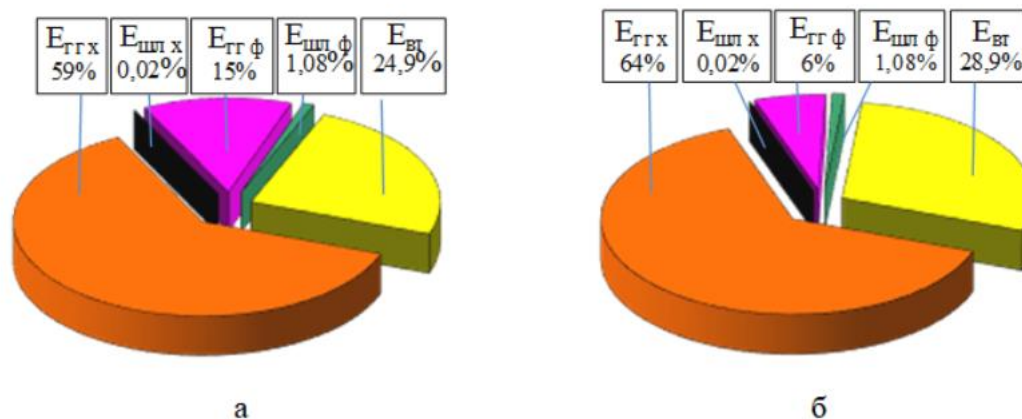


Рисунок 2 – Структура витратної частини ексергетичного балансу процесу повітряної (а) та кисневої (б) газифікації

Хімічні процеси в газогенераторі протікають при високих температурах, тому генераторний газ володіє значною фізичною ексергією, яку можливо використовувати для одержання теплової енергії. Фізична ексергія генераторного газу кисневої газифікації менше на 9% ніж для повітряної, що обумовлюється меншою кількістю генераторного газу при кисневій газифікації вугілля та зменшенням на 6% вмісту негорючих компонентів H<sub>2</sub>O і CO<sub>2</sub> в цьому газі.

Хімічна ексергія шлаку незначна, але можливо її використання як сировини в подальших виробничих процесах. Хімічна і фізична ексергія шлаку, залежно від способу дуття, не змінюється, тому що не змінюється склад та вихід шлаків, і становить 1,1 % від витратної частини балансу процесу газифікації.

Втрати процесу, які складаються із втрат від необоротності процесу окислювання вугілля, втрат у навколишнє середовище, втрат у результаті віднесення вугільних часток і крапель шлаку, при кисневій газифікації на 4 % більше в порівнянні з повітряною газифікацією.

Досліджено вплив температури процесу і виду окислювача на ексергію продуктів газифікації вугілля, що представлено на рис. 3 на прикладі повітряної газифікації.

Визначено, що з підвищенням температури в реакторі вміст горючих компонентів генераторного газу CO і H<sub>2</sub> знижується, що призводить до зниження хімічної ексергії газу, яка в середньому складає 8,5 МДж/кг вугілля. Вміст негорючих компонентів H<sub>2</sub>O і CO<sub>2</sub> навпроти збільшується, при цьому зростає температура процесу, а отже і фізична ексергія газу збільшується і в середньому складає 4,5 МДж/кг вугілля. Підвищення температури на 100 °C призводить до зменшення частки вмісту H<sub>2</sub> та CO в середньому на 4 % за об'ємом і призводить до зменшення хімічного потенціалу в середньому на 1 МДж/кг вугілля й одночасно до збільшення фізичного потенціалу також у середньому на 1 МДж/кг вугілля.

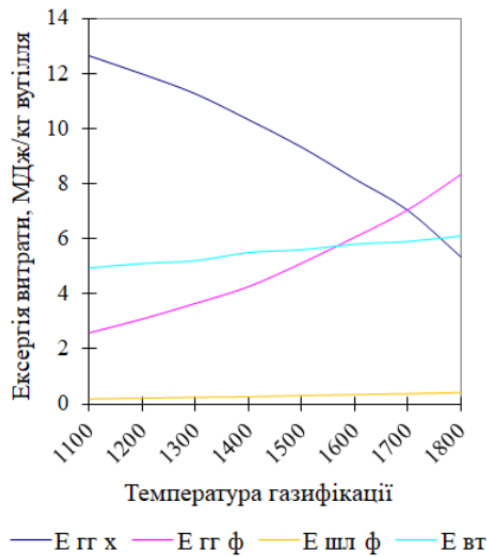


Рисунок 3 – Вплив температури процесу на ексергію продуктів газифікації

Фізична ексергія шлаку за рахунок підвищення температури процесу газифікації незначно зростає: підвищення температури на 100 °С підвищує фізичну ексергію шлаку у середньому на 31 кДж/кг вугілля. Хімічна ексергія шлаку не змінюється, оскільки не змінюється склад та вихід шлаків, і становить 5 кДж/кг вугілля. Зі збільшенням температури за рахунок реакцій горіння зростають втрати від необоротності процесу горіння.

Також досліджено вплив температури процесу і виду окислювача на ККД ексергетичної досконалості процесу газифікації вугілля. Результати досліджень, які визначено відповідно до методики ексергетичного аналізу [10,11], представлені на рис. 4.

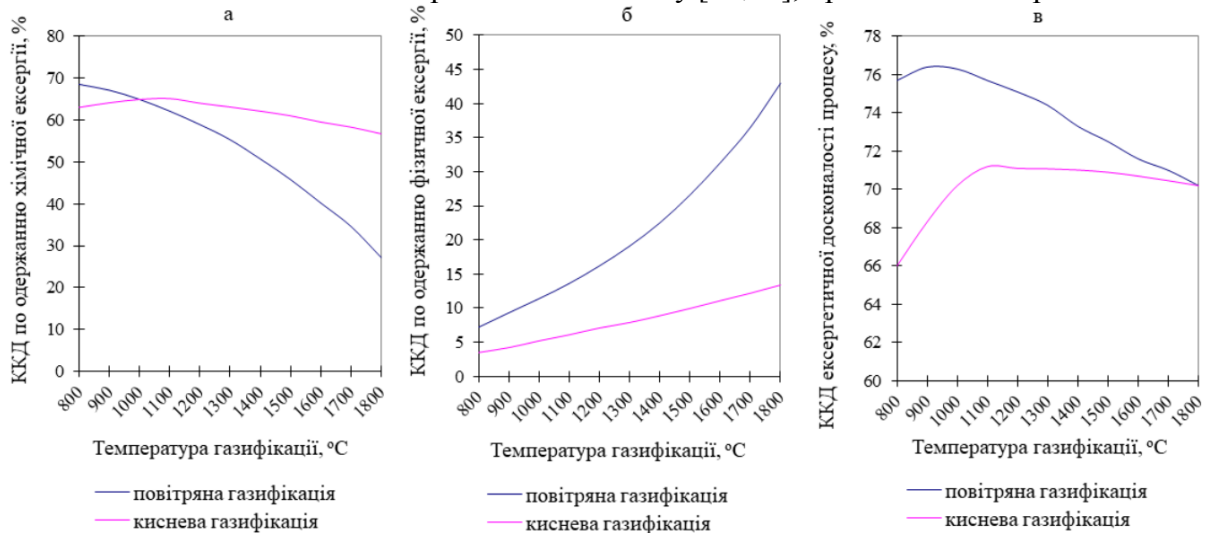


Рисунок 4 – Вплив температури процесу на ККД ексергетичної досконалості процесу газифікації вугілля: а) ККД по одержанню хімічної ексергії; б) ККД по одержанню фізичної ексергії; в) загального ККД

Як видно з отриманих результатів досліджень, при повітряній газифікації максимум ексергетичного ККД спостерігається при температурі 900 °С та становить 76,4 %, при цьому сумарна хімічна ексергія – 13,66 МДж/кг вугілля, а при кисневій газифікації максимальний ексергетичний ККД досягається при температурі 1100 °С і

складає 71,2 %, а сумарна хімічна ексергія становить 13,25 МДж/кг вугілля. Це пояснюється тим, що при цій температурі досягається максимальний вміст горючих компонентів генераторного газу, а отже і його максимальна хімічна ексергія. Оскільки при подальшому підвищенні температури в реакторі вміст горючих компонентів газу знижується, а негорючих – навпроти збільшується, то змінюються і значення хімічної та фізичної ексергії.

У випадку повітряної газифікації з підвищенням температури відбувається зменшення хімічної ексергії генераторного газу та значне збільшення його фізичної ексергії, при цьому загальний ККД зменшується незначно, оскільки зменшення хімічної ексергії супроводжується рівномірним збільшенням фізичної ексергії. У випадку кисневої газифікації подальше підвищення температури призводить до незначного зменшення ККД по одержанню хімічної ексергії внаслідок незначного зменшення вмісту CO та H<sub>2</sub> (підвищення температури на 100 °C призводить до зниження вмісту на 3,6 %). Зменшення хімічної ексергії супроводжується рівномірним збільшенням фізичної ексергії, що призводить до незначного зменшення загального ККД процесу (підвищення температури на 100 °C приводить до зниження ККД у середньому на 0,17 %).

З отриманих результатів видно, що при температурі 1000 °C графіки залежності впливу температури на ексергетичні ККД по одержанню хімічної ексергії кисневої та повітряної газифікації перетинаються в точці, значення ККД якої дорівнює 65 %.

В результаті досліджень ефективності повітряної та кисневої газифікації визначено, що з метою досягнення найвищої ефективності використання палива доцільно утилізувати теплоту одержуваного генераторного газу. Утилізація 1 МДж/кг вугілля фізичної ексергії газу призводить до збільшення загального ККД повітряної газифікації на 3,5 %, а загального ККД кисневої газифікації приблизно на 0,7 %.

В роботі також було проведено дослідження впливу методу термічної переробки вугілля на ексергетичну досконалість процесу. Зроблено порівняльний аналіз традиційного спалювання вугілля та процесу його газифікації при повітряному та кисневому дутті. Результати розрахунків ексергетичних балансів представлені на рис. 5–6, які відображають ексергетичну характеристику одержуваних продуктів і ексергетичну досконалість розглянутих методів термічної переробки.

За результатами дослідження визначено, що газифікація вугілля є більш раціональним методом його термічної переробки в порівнянні з традиційним спалюванням, оскільки найбільші втрати спостерігаються в процесі згоряння вугілля, ексергетичний ККД якого становить 64,8 %. При згорянні вугілля необоротні втрати процесу становлять 35 % його вихідної ексергії.

Генераторний газ можливо використовувати як паливо для енергетичних котлів побутових і промислових котелень, паливо для двигунів внутрішнього згоряння і газоподібних турбін, паливо для сушильних і теплообмінних апаратів різного призначення, тобто як альтернатива природного газу або рідких видів палива, таких як бензин, дизельне паливо, мазут і т.п.

У газових турбінах можливе використання низькокалорійного генераторного газу. При повітряній газифікації виробляється низькокалорійний генераторний газ із високою теплотворною здатністю 4–6 МДж/м<sup>3</sup> і досить великим виходом газу. В такому разі для газових турбін більш ефективним режимом є повітряна газифікація при температурі 900–1100 °C, де досягається максимальна ексергетична досконалість процесу 75,7–76,3 %. Але отриманий при цих умовах генераторний газ не придатний для транспортування по трубопроводу через низький енергетичний потенціал. Газифікація з ви-



користанням кисню дає середньокалорійний газ із теплотворною здатністю 10–12 МДж/м<sup>3</sup>, який є придатним для транспортування по трубопроводу.

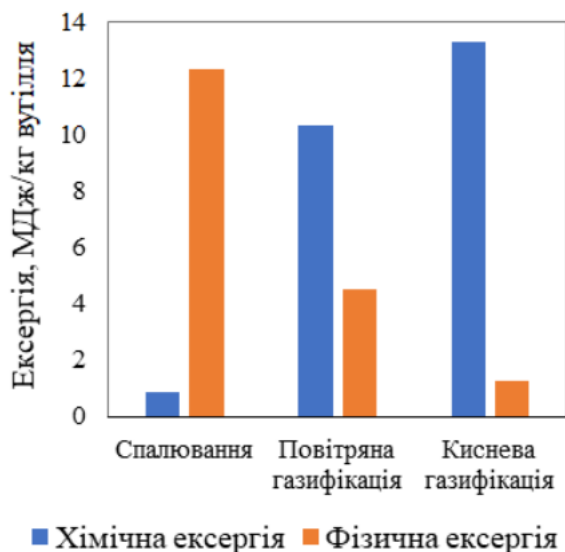


Рисунок 5 – Ексергетична характеристика одержуваних продуктів термічної переробки вугілля

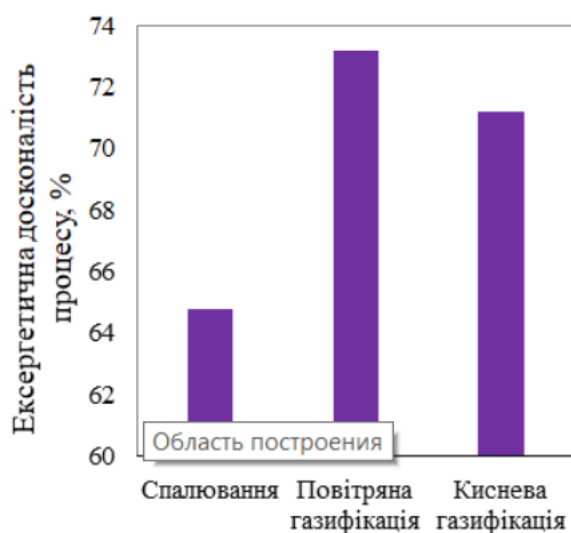


Рисунок 6 – Ексергетична досконалість методів термічної переробки вугілля

З метою одержання горючих газів більш ефективно застосовувати кисневу газифікацію при температурах вище 1200 °С, при цьому ККД по одержанню хімічної ексергії близький до максимального і становить 71,2 %.

Для доменних печей застосовують відновлювальний газ, вміст негорючих компонентів якого (H<sub>2</sub>O+CO<sub>2</sub>) повинне становити менше 5 %, тому для цих цілей більш раціональним методом є повітряна й киснева газифікація при температурі в реакторі 1100 °С, ексергетичний ККД якого дорівнює 76,3 %, хімічна ексергія генераторного газу становить 12,6 МДж/кг вугілля.

Таким чином, вибір раціональної температури ведення процесу газифікації вугілля при повітряному та кисневому дутті визначається кінцевими цілями використання генераторного газу.

**Висновки.** При термічній переробці вугілля виходять різноманітні види палива і сировини, які можливо використовувати в різних галузях промисловості. Для ефективного енерговикористання таких продуктів в різних установках необхідно проводити не лише енергетичний аналіз процесу, а і ексергетичний, який враховує не тільки кількісні, але і якісні особливості енергопотоків та енергоносіїв, що дає можливість оцінити ступінь досконалості різних процесів і установок. В роботі проведено дослідження впливу методу термічної переробки вугілля на ексергетичну досконалість процесу та визначено, що газифікація вугілля є більш раціональним методом його термічної переробки в порівнянні з традиційним спалюванням.

Досліджено вплив температури процесу і виду окислювача на ексергію продуктів газифікації і ККД ексергетичної досконалості процесу. Визначено, що при підвищенні температури в реакторі вміст горючих компонентів газу CO і H<sub>2</sub> знижується, що призводить до зниження хімічної ексергії генераторного газу, а отже і зменшення ККД по одержанню хімічної ексергії, а фізична ексергія генераторного газу при цьому збільшується, що впливає на ККД ексергетичної досконалості процесу газифікації.

Проведено порівняння ефективності повітряної та кисневої газифікації та вибрані раціональні температурні режими процесу в залежності від кінцевих цілей використання отриманих продуктів. Визначено перевагу високотемпературної кисневої та повітряної газифікації, яка характеризується низькими втратами ексергії (24,9–28,9 %) та високим хімічним потенціалом (12–13,46 МДж/кг вугілля). ККД ексергетичної досконалості процесу кисневої газифікації складає 68,3–71,2 %, а для повітряної – 70,2–76,3 %, що визвано великим виходом продуктів переробки.

Отримані дані дають підстави розглядати процес газифікації як раціональний метод переробки вугілля, особливо низькосортного вугілля та відходів збагачення, що досить простий у технічній реалізації на підприємствах і в енергетиці.

#### Література

1. Chepeliev M., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A. Can Ukraine go “green” on the post-war recovery path? // *Joule*. – 2023. – Vol 7. – P. 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.007>.
2. Україна та Європейський зелений курс. Річний моніторинговий звіт. – 2023. – 46 с. <https://dixigroup.org/analytic/ukrayina-ta-yevropejskyj-zelenyj-kurs-richnyj-monitoryngovyj-zvit-2023>.
3. Chyou YP., Chiu HM., Chen PC., Chien HY., Wang T. Coal-derived synthetic natural gas as an alternative energy carrier for application to produce power - comparison of integrated vs. non-integrated processes // *Energy*. – 2023. – Vol. 282. – P. 128958. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128958>.
4. Mishra A., Gautam S., Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification // *International Journal of Coal Science and Technology*. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 113–125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>.
5. Куделя П.П., Дубовський С.В. Енергетичний і ексергетичний підходи до проблеми раціонального використання енергії // *Енергетика: економіка, технології, екологія: науковий журнал*. – 2020. – №2 (60). – С. 7–16. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54308>.
6. Volianska L. G., Pikul M. Energy and exergy efficiency analysis of combined heat and power plant // *Наукоємні технології*. – 2019. – №4 (44). – С. 468–475. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.44.14323>.

7. Фіалко Н.М., Степанова А.І., Навродська Р.О., Шевчук С.І. Ексергетична ефективність утилізатора теплоти відхідних газів теплового двигуна когенераційної установки // Теплофізика та теплоенергетика. – 2020. – Т. 42. – №3. – С. 56–60. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.6>.
8. Terzi R. Application of Exergy Analysis to Energy Systems / Application of Exergy, Chapter 6. – IntechOpen, 2018. – P. 109–123. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74433>.
9. Michaelides E. Exergy Analysis for Energy Conversion Systems. – Cambridge University Press, 2021. – 314 p. ISBN: 9781108480581.
10. Dincer I., Rosen M. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Third Edition. - Elsevier Science, 2020. – pp. 23–35, 37–60, 167–210, 479–514. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02067-3>.
11. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. – Paragon Publishing, 2012. – pp. 29–56, 99–161. ISBN 978-1908341891, eISBN 9781483100364.
12. Seyitoglu SS, Dincer I, Kilicarslan A. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 4. – p. 2592–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>.

## Bibliography (transliterated)

1. Chepeliev M., Diachuk O., Podolets R., Semeniuk A. Can Ukraine go “green” on the post-war recovery path? // Joule. – 2023. – Vol 7. – P. 606–611. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2023.02.007>.
2. Ukrayina ta Yevropeys'kyy zelenyy kurs. Richnyy monitorynhovyy zvit. – 2023. – 46 p. <https://dixigroup.org/analytic/ukrayina-ta-yevropejskyj-zelenyj-kurs-richnyj-monitoryngovyj-zvit-2023>.
3. Chyou YP., Chiu HM., Chen PC., Chien HY., Wang T. Coal-derived synthetic natural gas as an alternative energy carrier for application to produce power - comparison of integrated vs. non-integrated processes // Energy. – 2023. – Vol. 282. – P. 128958. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128958>.
4. Mishra A., Gautam S., Sharma T. Effect of operating parameters on coal gasification // International Journal of Coal Science and Technology. – 2018. – Vol. 5 (2). – P. 113–125. <https://doi.org/10.1007/s40789-018-0196-3>.
5. Kudelya P.P., Dubovs'kyi S.V. Enerhetychnyy i ekserhetychnyy pidkhody do problemy ratsional'noho vykorystannya enerhiyi // Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya: naukovyy zhurnal. – 2020. – №2 (60). – P. 7–16. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54308>.
6. Volianska L.G., Pikul M. Energy and exergy efficiency analysis of combined heat and power plant // Наукоємні технології. – 2019. – №4 (44). – С. 468–475. <https://doi.org/10.18372/2310-5461.44.14323>.
7. Fialko N.M., Stepanova A.I., Navrods'ka R.O., Shevchuk S.I. Ekserhetychna efektyvnist' utylizatora teploty vidkhidnykh haziv teplovoho dvyhuna koheneratsiynoyi ustanovky // Теплофізика та теплоенергетика. – 2020. – Т. 42. – №3. – P. 56–60. <https://doi.org/10.31472/ttpe.3.2020.6>.
8. Terzi R. Application of Exergy Analysis to Energy Systems / Application of Exergy, Chapter 6. – IntechOpen, 2018. – P. 109–123. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.74433>.

9. Michaelides E. Exergy Analysis for Energy Conversion Systems. – Cambridge University Press, 2021. – 314 p. ISBN: 9781108480581.

10. Dincer I., Rosen M. Exergy: Energy, Environment and Sustainable Development, Third Edition. - Elsevier Science, 2020. – pp. 23–35, 37–60, 167–210, 479–514. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-02067-3>.

11. Kotas T.J. The Exergy Method of Thermal Plant Analysis. – Paragon Publishing, 2012. – pp. 29–56, 99–161. ISBN 978-1908341891, eISBN 9781483100364.

12. Seyitoglu SS, Dincer I, Kilicarslan A. Energy and exergy analyses of hydrogen production by coal gasification // International Journal of Hydrogen Energy. – 2017. – Vol. 42, Issue 4. – p. 2592–2600. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.228>.

УДК 621.1.016.7

В. О. Пінчук, д. техн. н., професор, Т. А. Шарабура, к. техн. н., доцент,  
М. С. Чемеринський, к. техн. н., доцент, С. А. Пінчук, аспірант

### **ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ПЕРЕРОБКИ ВУГІЛЛЯ**

Для розробки енергозберігаючих технологій і установок, що використовують вугілля, необхідна оцінка енергетичного потенціалу одержуваних продуктів. Крім того, необхідно визначити їх придатність для конкретних технологій, процесів і установок. Запропоновано крім енергетичного методу використовувати ексергетичний метод, що дозволяє оцінити не тільки кількісну, але і якісну сторону процесів термічної переробки. Для енергетики та промисловості становлять інтерес такі термічні методи переробки, як спалювання та газифікація.

В роботі виконано розрахунки ексергетичної досконалості продуктів термічної переробки вугілля, за результатами яких складені матеріальні та ексергетичні баланси процесу газифікації при повітряному й кисневому дутті та процесу спалювання, проведено аналіз впливу температури процесів на характеристики продуктів термічної переробки вугілля (склад, вихід, ексергія), а також розраховані ККД ексергетичної досконалості (загальної, по одержанню хімічної та фізичної ексергії) цих методів термічної переробки.

На основі аналізу визначені раціональні режими ведення процесів термічної переробки залежно від кінцевих цілей одержаних продуктів. Визначено перевагу високо-температурної кисневої та повітряної газифікації, яка характеризується низькими втратами ексергії (24,9–28,9 %) та високим хімічним потенціалом (12–13,46 МДж/кг вугілля). ККД ексергетичної досконалості процесу кисневої газифікації складає 68,3–71,2 %, а для повітряної – 70,2–76,3 %. Також визначено, що з метою досягнення найвищої ефективності використання палива доцільно утилізувати теплоту одержуваного генераторного газу. Утилізація 1 МДж/кг вугілля фізичної ексергії газу призводить до збільшення загального ККД повітряної газифікації на 3,5 %, а загального ККД кисневої газифікації приблизно на 0,7 %.

Проведено порівняння ексергетичної досконалості процесів, на основі чого виявлено, що газифікація вугілля є більш раціональним методом його термічної переробки в порівнянні з традиційним спалюванням, оскільки найбільші втрати спостерігаються в процесі згоряння вугілля, ексергетичний ККД якого становить 64,8 %. При згоранні вугілля необоротні втрати процесу становлять 35 % його вихідної ексергії.

**Ключові слова:** вугілля, повітряна газифікація, киснева газифікація, ексергетичний баланс, хімічна ексергія, фізична ексергія, ККД ексергетичної досконалості.

V. O. Pinchuk, T. A. Sharabura, M. S. Chemerynskyi, S. A. Pinchuk

## EXERGY ANALYSIS OF COAL THERMAL CONVERSION PROCESSES

To develop energy-saving technologies and facilities that use coal, it is essential to evaluate the energy potential of the resulting products. Additionally, it is necessary to determine their suitability for specific technologies, processes, and installations. Alongside the energy method, it is proposed to use the exergy method, which allows for the assessment of not only the quantitative but also the qualitative aspects of thermal conversion processes. Thermal conversion methods such as combustion and gasification are of interest for both energy and industrial applications.

The study includes calculations of the exergy efficiency of coal thermal conversion products, based on which material and exergy balances were compiled for the gasification process under air and oxygen blast conditions, as well as for the combustion process. An analysis was conducted to evaluate the impact of process temperatures on the characteristics of coal thermal conversion products (composition, output, exergy). Additionally, the exergy efficiency coefficients (overall, chemical and physical exergy) for these thermal conversion methods were calculated.

Based on the analysis, optimal operating modes for coal thermal conversion processes were determined, depending on the final goals of the obtained products. The advantages of high-temperature oxygen and air gasification were identified, characterized by low exergy losses (24.9–28.9 %) and high chemical potential (12–13.46 MJ/kg of coal). The exergy efficiency of the oxygen gasification process is 68.3–71.2 %, while for air gasification, it is 70.2–76.3 %. It was also established that, to achieve the highest fuel utilization efficiency, it is advisable to utilize the heat of the produced syngas. The utilization of 1 MJ/kg of coal from the physical exergy of the gas increases the overall exergy efficiency of air gasification by 3.5 % and that of oxygen gasification by approximately 0.7 %.

A comparison of the exergy efficiency of the processes was conducted, revealing that coal gasification is a more rational method of thermal conversion compared to traditional combustion. This is because the highest losses are observed during the combustion process, with an exergy efficiency of 64.8 %. During coal combustion, irreversible losses account for 35 % of its initial exergy.

**Keywords:** coal, air gasification, oxygen gasification, exergy balance, chemical exergy, physical exergy, exergy efficiency.

О. Б. Аніпко<sup>1</sup>, д. техн. н., професор, Д. С. Баулін<sup>2</sup>, к. техн. н., с. н. с.,  
С. А. Манжура<sup>2</sup>, д-р філософії

## СТРУКТУРА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НІТРОЦЕЛЮЛОЗНИХ ПОРОХІВ У ПЕРІОД ЇХ ЗБЕРІГАННЯ МІЖ ВИРОБНИЦТВОМ ТА УТИЛІЗАЦІЄЮ

<sup>1</sup>Харківський Національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

<sup>2</sup>Національна академія Національної гвардії України, Харків

**Ключові слова:** нітроцелюлозні порохові заряди, система моніторингу, інформативні показники, гарантійний термін зберігання, регенерація, післярегенераційний період, критерії оцінки стану, економічне обґрунтування, життєвий цикл.

**Постановка проблеми та аналіз публікацій.** Огляд та аналіз доступних джерел [1–12], а також фактичних даних про заряди, що зберігаються, на основі нітроцелюлозних порохів (НЦП) (не буде перебільшенням сказати – практично у всіх країнах світу) показує, що:

1. Немає умов зберігання, за яких властивості НЦП залишалися незмінними.
2. З різних причин завжди є певна кількість боеприпасів на післягарантійному терміні зберігання.
3. Зміни властивостей НЦП можуть бути такими, що призводять до техногенних аварій та катастроф як у сценарії застосування їх за призначенням, так і у сценарії зберігання їх на базах та складах.

З огляду на це виникає завдання оцінки стану та прогнозування властивостей НЦП на відповідних етапах зберігання.

Ця задача комплексна і може бути вирішена із застосуванням загальновідомого підходу до вирішення таких завдань, а саме системи моніторингу.

Як відомо, у загальному випадку будь-яка система моніторингу включає три основні компоненти:

- вимірювання інформативних параметрів;
- оцінка поточного стану на основі виконаних вимірювань;
- прогноз.

Як бачимо із основних складових системи моніторингу, для практичної реалізації першої складової необхідно виділити інформативні показники, на основі виміру яких можна оцінити стан НЦП.

Для кожного з таких показників необхідно розробити методику його виміру та визначити необхідні засоби виміру, тобто інструментальну базу.

Після цього можна перейти до здійснення другої складової, проте для її повної реалізації необхідно розробити критерії, які б дозволяли однозначно оцінювати стан заряду.

Тут суттєвою підмогою і те, що для таких зарядів визначено гарантійний термін зберігання, тобто такий період часу, протягом якого виробник гарантує збереження всіх

встановлених стандартами експлуатаційних показників та характеристик порошу за умови дотримання правил зберігання.

У часовому відношенні такий термін становить період до 10 років. При цьому передбачається, що основний інформативний показник – початкова швидкість, не знизиться більш ніж на 5 % від табличного значення.

Отже, можна виділити другий критерій – відхилення значення початкової швидкості від табличного. Тут же можна визначити межу застосування за призначенням на післягарантійному терміні зберігання. Така межа може бути визначена умовою введення поправок у вихідні дані для стрільби, які можна практично реалізувати у відповідній ствольній системі.

Однак слід окремо розглядати боєприпаси осколково-фугасної та кінетичної (бронебійної) дії. Оскільки для бронебійних боєприпасів суттєве значення відіграє їх кінетична енергія при зустрічі з броньовою перешкодою, то зниження початкової швидкості снаряда нижче 5 % від табличного значення буде призводити до зниження бронепробиття на встановленій дальності. Отже, при оцінці стану необхідно визначити ефективну дальність для відповідного терміну зберігання, яка буде забезпечувати задане бронепробиття. Варто зазначити, що для боєприпасів кумулятивної дії падіння початкової швидкості не таке важливе, як для боєприпасів кінетичної дії [13].

Оцінка стану порохового заряду характеризується двома основними висновками:

- подальше застосування за призначенням можливе;
- подальше застосування за призначенням неможливе.

На цьому етапі постає питання прогнозування подальшого часу життєвого циклу виробу.

У тому випадку, якщо, як було показано в попередніх публікаціях, боєприпас втратив свої властивості в таких межах, що вони можуть бути відновлені розробленим методом регенерації, слід оцінити можливий післярегенераційний період зберігання, який повинен бути економічно обґрунтований. Якщо НЦП втратив свої властивості настільки, що він не підлягає регенерації, то така партія повинна бути вилучена з подальшої експлуатації та утилізована.

У цьому виникає наступне завдання розробки моделі зміни властивостей НЦП для прогнозування його стану. Такі моделі було розроблено раніше [4, 5, 14].

Досвід розвинених країн світу показує, що в кожній країні є свій підхід до вирішення таких проблем [15, 16].

Малостійкі порохи не тільки не вигідні в економічному відношенні, тому що необхідно часте освіження бойового запасу, а й становлять значну небезпеку. Відомі випадки, коли самозаймання порошу супроводжувалося людськими жертвами, інколи ж приймало розміри великих катастроф [4-6, 16].

Проблема зберігання та накопичення великої кількості боєприпасів, а саме порохових зарядів, характерна не лише для України, але й для таких розвинених країн НАТО як США (вибух у гарматній вежі лінкору “Айова”, 1989 рік), Німеччина (розриви стволів артилерійських систем), Франція (вибух на складі боєприпасів, 2007 рік), Чехія (вибухи складів боєприпасів у Врбетиці, 2014).

Є дані, що у Німеччині, Франції запроваджено систему безперервного моніторингу стану боєприпасів. Тому що невідомо, як зберігаються боєприпаси, а головне, за яких умов.

Як елементи системи моніторингу існують пересувні лабораторії, в яких перед

стрільбою проводиться аналіз порохових зарядів боєприпасів вибіркової партії і на його основі пропонуються рекомендації щодо їх використання.

Критично оцінюючи досвід зарубіжних країн можна зробити висновок, що на сьогоднішній день ця проблема не вирішена, оскільки в Німеччині під час проведення польових обстежень стану боєприпасів перед стрільбою сталися вибухи в самих пересувних лабораторіях, що свідчить про недосконалість методики дослідження, її небезпеку.

Таким чином, слід ще раз наголосити, що існує комплексна наукова проблема щодо безперервного у часі спостереження за станом зарядів на основі НЦП, і це завдання може бути вирішене шляхом впровадження системи моніторингу.

У зв'язку з цим **метою статті** є визначення необхідності створення чинної системи моніторингу на рівні держави, яка б у короткий термін давала об'єктивні дані про стан наявних запасів боєприпасів і можливості їх подальшої експлуатації.

**Виклад основного матеріалу. Структура системи моніторингу зарядів на основі НЦП.** Як було представлено вище, НЦП є нестійкими хімічними сполуками. З часом споживчі властивості порохового заряду можуть настільки змінитися, що заряди будуть не тільки непридатні для застосування за призначенням, але й стануть небезпечними для персоналу та ствольної системи. З цим пов'язана проблема встановлення термінів безпечного зберігання порохів та їхньої експлуатаційної придатності, необхідності постійної системи контролю їх стану.

Однак у розвинених країнах НАТО практично немає системи моніторингу порохових зарядів на всьому терміні їх зберігання. В окремих країнах є деякі складові цієї системи, але її елементи не повною мірою охоплюють весь спектр стану порохових зарядів.

Для ефективної роботи системи моніторингу необхідні інформативні показники, що дозволяють визначати стан порохових зарядів без застосування складної діагностичної апаратури.

У цьому дослідженні для контролю за станом нітроцелюлозних порохових зарядів (НЦПЗ) пропонується створити систему моніторингу (рис. 1). Крім того, це дозволить створити базу даних порохових зарядів для подальшого контролю їхнього стану протягом усього життєвого циклу.

Як видно з структурної схеми система моніторингу включає як вже розроблені елементи, так і ті, які вимагають додаткових досліджень і розробок.

Пропонуються наступні елементи системи моніторингу стану НЦПЗ.

Маємо три складові системи моніторингу: вимір (тобто контроль того, що вимірюється), стан та прогноз.

Під складовою вимірювань знаходяться показники та методи їх виміру.

На світлому фоні – структурні елементи системи моніторингу, які загальновідомі та застосовуються для оцінки балістичних характеристик.

Сірим фоном виділено то, що пропонується у даній роботі як нові структурні складові.

Далі, оцінка стану порохових зарядів проводиться на основі критеріїв.

На даний момент існують декілька критеріїв оцінки стану:

- початкова швидкість;
- тиск у каналі ствола в різні періоди пострілу;



– термін експлуатації.

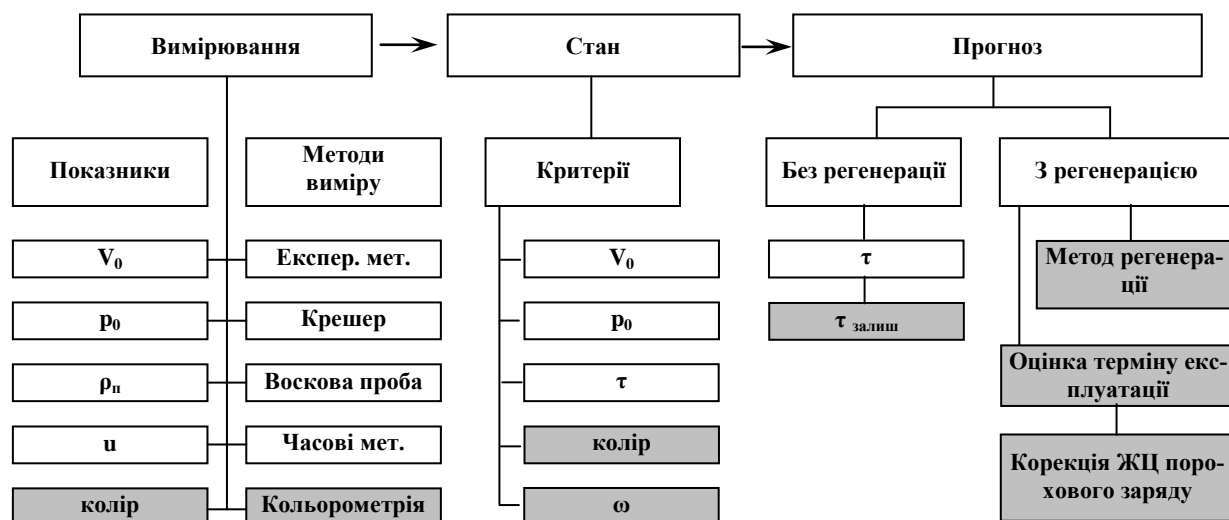


Рисунок 1 – Структурна схема системи моніторингу

У роботі пропонується запровадити додаткові критерії оцінки стану. Це колір та маса ПЗ [17, 18].

На далі – прогноз стану порохових зарядів.

Поділяється на – Без проведення регенерації порохового заряду (ПЗ) та з регенерацією [19, 20].

Без проведення регенерації ПЗ маємо такі показники, як час експлуатації та ресурс, що залишився.

З регенерацією пропонується:

- метод її проведення;
- оцінка терміну експлуатації ПЗ;
- корекція життєвого циклу з точки зору після регенераційного періоду.

Окремо слід зупинитись на економічному обґрунтуванні витрат на регенерацію. Тут слід підкреслити, що, як мінімум, таке економічне обґрунтування має ґрунтуватися на двох обмеженнях:

- витрати на регенерацію менше витрат на виготовлення нової партії;
- час на регенерацію менше часу виготовлення такої ж кількості заряду.

Слід особливо підкреслити, що для регенерації НЦП, на основі співвідношень масопереносу, розроблені основні етапи технологічного процесу та визначені конструкція і розміри апарата [21].

У випадку проведення конкретних техніко-економічних розрахунків одне з обмежень може бути знято. Так, наприклад, якщо витрати менші на виготовлення, але за часом обмеження не виконуються, то в певних умовах це може бути доцільним. І навпаки, якщо час суттєво менший і задовольняє заданим термінам, щоб почати використовувати цей боєприпас за призначенням, але витрати в допустимих межах перевищують витрати на нову партію, це також може бути визнано доцільним.

Слід особливо підкреслити, що в умовах дефіциту, що почався, на первинну сировину для вироблення нітроцелюлози [22–25], метод регенерації НЦП набуває

особливої привабливості у зв'язку з тим, що не вимагає вихідної сировини. Тому він може бути доцільним в умовах, коли первинна сировина недоступна, обмежена в кількості або містить інші неприйнятні фактори.

Актуальність проведення регенерації заключається ще і в тому, що технологические мощности не позволяют в короткий интервал времени накопить достаточно большое количество зарядов.

**Технологія регенерації.** Після визначення партії НЦП, що підлягає регенерації, відповідно до технології, розробленої для відновлення властивостей порошу [19, 20, 26], здійснюється технологічний процес.

Теоретично та експериментально доведено, що спосіб регенерації НЦП можливий і полягає у дії 47 % розчину перекису водню на елементи порошу, що дозволяє провести часткову омологацію балістичних та енергетичних характеристик порохових зарядів боєприпасів тривалого зберігання.

Виходячи з результатів експериментальних досліджень та теоретичної (ідеальної) формули нітроцелюлози, показано принципову можливість протікання реакції на її поверхні з перекисом водню [19–21]. Експериментально показано, що в результаті регенерації збільшується маса нітроцелюлози на величину адсорбованих елементів у процесі обробки перекисом водню. У зв'язку з цим збільшується швидкість горіння порошу та підвищується його теплотворна здатність як палива.

За теплотворною здатністю водень характеризується величиною 120,9 МДж/кг, тоді як піроксиліновий порох при постійному об'ємі – 5,9 МДж/кг. Таким чином, для еквівалентної компенсації втраченої маси порошу необхідна у 20 разів менша маса водню. При експериментальному дослідженні спостерігалось збільшення маси порохового заряду до 1,5 % за рахунок водню, що призводить до збільшення теплотворної здатності [20].

Прогнозування змін характеристик порохового заряду – одне із завдань, пов'язаних із проблемою експлуатації боєприпасів. На різних термінах зберігання найважливішим показником змін властивостей порохового заряду показник початкової швидкості снаряда.

За результатами прогнозу на основі даних про проведену регенерацію маса порошу збільшиться, що, у свою чергу, призводить до підвищення початкової швидкості до 5 %. Цей результат дозволить збільшити термін експлуатації боєприпасів на 9–12 років додатково [27].

Виявлений у процесі розробки методу регенерації ефект може бути застосований і для зарядів, що знову виготовляються, коли його вихідна маса може бути відповідним чином зменшена, після чого складовий заряд обробляється перекисом водню і, таким чином, остаточно досягається необхідна сила порошу і його теплотворна здатність.

Особливо важливо підкреслити, що сама собою така процедура є тривіальною (заміна одного палива іншим), проте зниження об'єму порохового заряду на величину 10–12 % дозволяє в наявному обмеженому об'ємі збільшити кількість заряду.

Критично оцінюючи пропонований метод слід зауважити, що на сучасному етапі автори не мають даних про стійкість НЦП, оброблених перекисом водню і які умови необхідно створювати, щоб отримані властивості зберігалися якомога довше.

Враховуючи те, що арсенали з боєприпасами тривалих термінів зберігання є в багатьох країнах світу, отриманий ефект, доведений до рівня промислової технології,

дозволить якщо не виключити, то суттєво скоротити об'єми утилізації такого роду порохових зарядів і тим самим суттєво заощадити кошти на замовлення нових.

**Висновки.** Набула подальшого розвитку теорія і експериментальні методи, які складають фундаментальне підґрунтя для створення системи моніторингу НЦПЗ тривалих термінів зберігання.

Розвинуто підхід до визначення інформативних показників, на основі яких обґрунтовані критерії для можливості регенерації, утилізації та подальшої експлуатації НЦПЗ.

Розвинуто підхід до визначення та обґрунтування нових складових елементів системи моніторингу стану НЦПЗ:

- кольорометрія порохових зарядів;
- контроль маси порохових зарядів;
- контроль початкової швидкості снаряда та тиску в каналі ствола у різні періоди пострілу;
- оцінка живучості ствольних систем в цілому при застосуванні боєприпасів різних термінів зберігання;
- новий післярегенераційний період у життєвому циклі НЦП.

#### Література

1. Weaver Erasmus. Military Explosives – Chemical Synthesis and Testing // Wexford College Press. 2006. P. 400.
2. Cook James R. The Chemistry and Characteristics of Explosive Materials Vantage Press. 2001. P. 118.
3. Роговин З.А. Химия нитроцеллюлозы. М.: Химия, 1972. 520 с.
4. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Горелишев С.А. Геронтологічні властивості порохових зарядів боєприпасів та їх вплив на показники живучості стрілецької зброї : Монографія. Х.: НА НГУ, 2019. 119 с.
5. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения : Монографія. Х.: АВВ МВД Украины, 2010. 130 с.
6. Баулін Д.С. Нитроцеллюлозні порохові заряди тривалих термінів експлуатації: проблемні задачі та їх можливі рішення // Інтегровані технології та енергозбереження. 2021. №4. С. 33–45.
7. Буллер М.Ф., Межевич Г.В. Производство и исследования пироксилиновых порохов. Хроматографические методы контроля // Хімічна промисловість України. 2011. № 2. С. 48–51.
8. Геньш К.В., Базарнова Н.Г. Окисленная целлюлоза. Получение. Применение в медицине // Химия растительного сырья. 2013. №4. 13–20.
9. Демченко А.А. Определение характеристик внутренней баллистики миномета при применении пороховых метательных зарядов длительных сроков хранения // Евразийский Союз Ученых. 2015. №12(21). С. 54–57.
10. Крюков О.М., Мельніков Р.С. Моделювання деградації металюного заряду при дослідженні впливу дефектів боєприпасів на балістичні елементи пострілу //

Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. 2021. № 2 (38). С. 33–41.

11. Гончаренко П.Д. Интегральная поправка в начальную скорость на износ ствола и геронтологические изменения порохового заряда // Збірник наукових праць Академії військово-морських сил імені П.С. Нахімова. 2011. №1 (5). С. 11–14.

12. Rubleva N.V., Lebedeva E.O., Afineevskii A.V., Voronova M.I., Surov O.V., Zakharov A.G. Production of cellulose nanocrystals by hydrolysis in mixture of hydrochloric and nitric acids // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2019. №12. P. 85–93.

13. Krapke, Paul-Werner. LEOPARD 2: sein Werden u. seine Leistung/ Paul-Werner Krapke/ – Herford; Bonn: Mittler, 1987.

14. Анипко О.Б., Бирюков И.Ю., Баулин Д.С. Модель массопереноса при хранении пороховых зарядов с учетом изменения температуры окружающей среды // Збірник наукових праць ХУПС ім. І Кожедуба. 2006. №2 (8). С. 50–54.

15. Анипко О.Б., Хайков В.Л. Анализ методов оценки состояния пороховых зарядов как элемент системы мониторинга артиллерийских боеприпасов // Інтегровані технології та енергозбереження. 2012. №3. С. 60–71.

16. Вертелецкий В.Ф. Прогнозирование изменения физико-химических свойств порохового заряда и начальной скорости 30 мм артиллерийских боеприпасов морской номенклатуры // Інтегровані технології та енергозбереження. 2012. №2. С. 24–31.

17. Анипко О.Б., Хайков В.Л., Четырин С.П. Цветометрия пороховых элементов метательных зарядов артиллерийских боеприпасов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2011. №1. С. 28–35.

18. Anipko, O., Baulin, D., Horielyshev, S., Boikov, I., Medvid, M., Plaksin, A., Ivanchenko, A., Titov, I., & Piskunov, S. Colorimetry method for nitrocellulose powder charge monitoring system // EUREKA: Physics and Engineering. 2024. (4). С. 54–66.

19. Анипко О.Б. Результаты экспериментального исследования воздействия перекиси водорода на нитроцеллюлозные высокомолекулярные соединения // Інтегровані технології та енергозбереження. 2014. № 2. С. 50–55.

20. Anipko, O., Baulin, D., Horielyshev, S., Boikov, I., Babkov, Y., Oleksenko, O., Misiuk, H., Kutsenko, V., Ivanets, M., & Voinov, V. Study of the nitrocellulose gunpowder regeneration process using hydrogen peroxide // EUREKA: Physics and Engineering. 2023. (5). С. 3–13.

21. Аніпко О.Б., Баулін Д.С. Модель масопереносу, деякі особливості технологій та основні параметри апарату для регенерації нітроцелюлозних порохів // Інтегровані технології та енергозбереження. 2024. №2. С. 35–50.

22. Компаниям в ЕС не хватает взрывчатых веществ, чтобы производить больше боеприпасов для Украины – FT. Available at: <https://www.eurointegration.com.ua/rus/news/2023/03/19/7158258/> (дата звернення 18.09.2024).

23. AFP: Европе не хватает пороха для изготовления снарядов. [Электронный ресурс]. Available at: <https://www.dw.com/ru/afp-evrope-ne-hvataet-poroha-dla-izgotovlenia-artillerijskih-snaradov/a-68436302> (дата звернення 19.08.2024).

24. Европа на 70% зависит от китайского хлопка для пороха и взрывчатки – FT. [Электронный ресурс]. Available at: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2024/04/8/712131/> (дата звернення 07.09.2024).

25. Производители оружия ЕС встревожены зависимостью от сырья из Китая, спрос растёт из-за войны – FT. [Электронный ресурс]. Available at: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2024/04/8/7450209/> (дата звернення 07.09.2024).

26. Баулін Д.С. Методика проведення експериментального дослідження щодо відновлення характеристик піроксилінових порохів // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №3. С. 30–41.

27. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Бірюков І.Ю., Гунько О.О. Прогнозування змін балістичних характеристик пострілів роздільно-гільзового заряджання із зарядами тривалих термінів експлуатації // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №1. С. 52–62.

#### Bibliography (transliterated)

1. Weaver Erasmus. Military Explosives – Chemical Synthesis and Testing // Wexford College Press. 2006. P. 400.

2. Cook James R. The Chemistry and Characteristics of Explosive Materials Vantage Press. 2001. P. 118.

3. Rohovyn Z.A. Khymyya nytrotsellyulozy. M.: Khymyya, 1972. 520 p.

4. Anipko O.B., Baulin D.S., Horyelyshev S.A. Herontolohichni vlastyvoli porokhovykh zaryadiv boeprypasiv ta yikh vplyv na pokaznyky zhyvuchosti strilets'koyi zbroyi : Monohrafiya. KH.: NA NHU, 2019. 119 p.

5. Anytko O.B., Busyak YU.M. Vnutrennyaya ballistyka stvol'nykh system pry pryimenenyy boeprypasov dlytel'nykh srokov khranenyaya : Monohrafiya. KH.: AVV MVD Ukrainy, 2010. 130 p.

6. Baulin D.S. Nytrotselyulozni porokhovi zaryady tryvalykh terminiv ekspluatatsiyi: problemni zadachi ta yikh mozhlyvi rishennya // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2021. №4. P. 33–45.

7. Buller M.F., Mezhevych H.V. Proyzvodstvo y yssledovannya pyroksylynovykh porokhov. Khromatohrafycheskye metody kontrolya // Khimichna promyslovist' Ukrainy. 2011. № 2. P. 48–51.

8. Hen'sh K.V., Bazarnova N.H. Okyslennaya tselyuloza. Poluchenye. Prymenenye v medytsyne // Khymyya rastytel'noho syr'ya. 2013. №4. 13–20.

9. Demchenko A.A. Opredelenye kharakterystyk vnutrenney ballistyky mynomety pry pryimenenyy porokhovykh metatel'nykh zaryadov dlytel'nykh srokov khranenyaya // Evrazyyskyy Soyuz Uchenykh. 2015. №12(21). P. 54–57.

10. Kryukov O.M., Mel'nikov R.S. Modelyuvannya dehradatsiyi metal'noho zaryadu pry doslidzhenni vplyvu defektiv boeprypasiv na balistychni elementy postrilu // Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy. 2021. № 2 (38). P. 33–41.

11. Honcharenko P.D. Yntehral'naya popravka v nachal'nyuy skorost' na yznos stvola y herontolohycheskye yzmenenyaya porokhovoho zaryada // Zbirnyk naukovykh prats' Akademiyi viys'kovo-mors'kykh syl imeni P.S. Nakhimova. 2011. №1 (5). P. 11–14.

12. Rubleva N.V., Lebedeva E.O., Afineevskii A.V., Voronova M.I., Surov O.V., Zakharov A.G. Production of cellulose nanocrystals by hydrolysis in mixture of hydrochloric and nitric acids // Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2019. №12. P. 85–93.

13. Krapke, Paul-Werner. LEOPARD 2: sein Werden u. seine Leistung/ Paul-Werner Krapke/ – Herford; Bonn: Mittler, 1987.

14. Anytko O.B., Byryukov Y.Yu., Baulyn D.S. Model' massoperenosa pry khranenny porokhovykh zaryadov s uchetom yzmenenyya temperatury okruzhayushchey sredy // Zbirnyk naukovykh prats' KHUPS im. I Kozheduba. 2006. №2 (8). P. 50–54.

15. Anytko O.B., Khaykov V.L. Analiz metodov otsenky sostoyannya porokhovykh zaryadov kak élement systemy monytorynha artylleryyskykh boeprypasov // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2012. №3. P. 60–71.

16. Verteletsky V.F. Prohnozyrovanye yzmenenyya fyzyko-khymycheskykh svoystv porokhovoho zaryada y nachal'noy skorosty 30 mm artylleryyskykh boeprypasov morskoy nomenklatury // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2012. №2. P. 24–31.

17. Anytko O.B., Khaykov V.L., Chetyryn S.P. Tsvetometryya porokhovykh élementov metatel'nykh zaryadov artylleryyskykh boeprypasov // Artylleryyskoe y strelkovoé vooruzhenye. 2011. №1. P. 28–35.

18. Anipko, O., Baulin, D., Horielyshev, S., Boikov, I., Medvid, M., Plaksin, A., Ivanchenko, A., Titov, I., & Piskunov, S. Colorimetry method for nitrocellulose powder charge monitoring system // EUREKA: Physics and Engineering. 2024. (4). P. 54–66.

19. Anytko O.B. Rezul'taty éksperymental'noho yssledovannya vozdeystviya perekysy vodoroda na nytrotsellyuloznye vysokomolekulyarnye soedynenyya // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2014. № 2. P. 50–55.

20. Anipko, O., Baulin, D., Horielyshev, S., Boikov, I., Babkov, Y., Oleksenko, O., Misiuk, H., Kutsenko, V., Ivanets, M., & Voinov, V. Study of the nitrocellulose gunpowder regeneration process using hydrogen peroxide // EUREKA: Physics and Engineering. 2023. (5). P. 3–13.

21. Anipko O.B., Baulin D.S. Model' masoperenosu, deyaki osoblyvosti tekhnolohiy ta osnovni parametry aparatu dlya reheneratsiyi nitrotselyuloznykh porokhiv // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2024. №2. P. 35–50.

22. Kompanyyam v ES ne khvataet vzryvchatykh veshchestv, chtoby proyzvodyt' bol'she boeprypasov dlya Ukrainy – FT. Available at: <https://www.eurointegration.com.ua/rus/news/2023/03/19/7158258/> (data zvernennya 18.09.2024).

23. AFP: Evrope ne khvataet porokha dlya yz-hotovlenyya snaryadov. [Élektronnyy resurs]. Available at: <https://www.dw.com/ru/afp-evrope-ne-hvataet-porokha-dla-izgotovleniya-artillerijskih-snaradov/a-68436302> (data zvernennya 19.08.2024).

24. Evropa na 70% zavysyt ot kytayskoho khlopka dlya porokha y vzryvchatky – FT. [Élektronnyy resurs]. Available at: <https://www.epravda.com.ua/rus/news/2024/04/8/712131/> (data zvernennya 07.09.2024).

25. Proyzvodytely oruzhyya ES vstrevozheny zavysymost'yu ot syr'ya yz Kytaya, spros rastet yz-za voyny – FT. [Élektronnyy resurs]. Available at: <https://www.pravda.com.ua/rus/news/2024/04/8/7450209/> (data zvernennya 07.09.2024).

26. Baulin D.S. Metodyka provedennya eksperymental'noho doslidzhennya shchodo vidnovlennya kharakterystyk piroksylinovykh porokhiv // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2022. №3. P. 30–41.

27. Anipko O.B., Baulin D.S., Biryukov I.Yu., Hun'ko O.O. Prohnozuvannya zmin balistychnykh kharakterystyk postriliv rozdil'no-hil'zovoho zaryadzhannya iz zaryadamy

tryvalykh terminiv ekspluatatsiyi // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2022. №1. P. 52–62.

УДК 355.014: 623.522

О. Б. Аніпко, д. техн. н., професор, Д. С. Баулін, к. техн. н., с. н. с.,  
С. А. Манжура, д-р філософії

## СТРУКТУРА СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ СТАНУ НІТРОЦЕЛЮЛОЗНИХ ПОРОХІВ У ПЕРІОД ЇХ ЗБЕРІГАННЯ МІЖ ВИРОБНИЦТВОМ ТА УТИЛІЗАЦІЄЮ

Стабільність порохових зарядів на основі нітроцелюлози відіграє вирішальну роль при встановленні терміну їх експлуатації. Як показує аналіз досліджень, практично у всіх країнах світу існує проблема збереження властивостей порохових зарядів на рівні гарантійних. Властивості нітроцелюлозних порохових зарядів постійно змінюються і є велика їх частина на післягарантійному етапі зберігання. Зміни властивостей НЦП можуть бути такими, що призводитимуть до техногенних аварій та катастроф, як при застосування їх за призначенням, так і при зберіганні їх на базах та складах. Таким чином, завдання оцінки стану та прогнозування властивостей НЦП на відповідних етапах зберігання набуває актуального значення.

Ця задача комплексна і може бути вирішена із застосуванням загальновідомого підходу до вирішення таких завдань, а саме системи моніторингу. У загальному випадку будь-яка система моніторингу включає три основні компоненти: вимірювання інформативних параметрів; оцінка поточного стану на основі виконаних вимірювань; прогноз.

Показано, що проблема зберігання та накопичення великої кількості боєприпасів, а саме порохових зарядів, характерна не лише для України, але й для таких розвинених країн НАТО як США, Німеччина, Франція, Чехія. Є дані, що у деяких країнах запроваджено систему безперервного моніторингу стану боєприпасів, але методики досліджень не досконалі і небезпечні.

Для контролю за станом нітроцелюлозних порохових зарядів пропонується створити систему моніторингу.

Представлено структурну схему системи моніторингу, яка включає як вже розроблені елементи, так і ті, які вимагають додаткових досліджень і розробок. Приведено, що для ефективної роботи системи моніторингу необхідні інформативні показники, що дозволяють визначати стан порохових зарядів без застосування складної діагностичної апаратури. Крім того, це дозволить створити базу даних порохових зарядів для подальшого контролю їхнього стану протягом усього життєвого циклу.

Розвинуто підхід до визначення та обґрунтування нових складових елементів системи моніторингу стану НЦПЗ.

**Ключові слова:** нітроцелюлозні порохові заряди, система моніторингу, інформативні показники, гарантійний термін зберігання, регенерація, післярегенераційний період, критерії оцінки стану, економічне обґрунтування, життєвий цикл.

O. Anipko, D. Baulin, S. Manzhura

**STRUCTURE OF THE SYSTEM FOR MONITORING THE CONDITION  
OF NITROCELLULOSE POWDER DURING THEIR STORAGE PERIOD  
BETWEEN PRODUCTION AND DISPOSAL**

The stability of powder charges based on nitrocellulose plays a decisive role in determining their service life. As the research analysis shows, in almost all countries of the world there is a problem of maintaining the properties of powder charges at the guarantee level. The properties of nitrocellulose powder charges are constantly changing, and a large part of them is in the post-warranty stage of storage. Changes in the properties of nitrocellulose powder charges can be such that they lead to man-made accidents and disasters, both when using them for their intended purpose and when they are stored in bases and warehouses. Thus, the task of assessing the state and forecasting the properties of nitrocellulose powder charges at the relevant stages of storage becomes relevant.

This task is complex and can be solved using a well-known approach to solving such tasks, namely a monitoring system. In general, any monitoring system includes three main components: measurement of informative parameters; assessment of the current state based on the performed measurements; forecast.

It is shown that the problem of storage and accumulation of a large amount of ammunition, namely powder charges, is characteristic not only for Ukraine, but also for such developed NATO countries as the USA, Germany, France, and the Czech Republic. There is evidence that in some countries a system of continuous monitoring of the state of ammunition has been introduced, but the research methods are imperfect and dangerous.

To control the state of nitrocellulose powder charges, it is proposed to create a monitoring system.

A structural diagram of the monitoring system is presented, which includes both already developed elements and those that require additional research and development. It is shown that for the effective operation of the monitoring system, informative indicators are necessary, which allow determining the state of powder charges without the use of complex diagnostic equipment. In addition, it will allow the creation of a database of powder charges for further monitoring of their condition throughout the entire life cycle.

An approach to defining and substantiating new constituent elements of the oil refinery condition monitoring system has been developed.

**Keywords:** nitrocellulose powder charges, monitoring system, informative indicators, warranty storage period, regeneration, post-regeneration period, condition assessment criteria, economic justification, life cycle.



М. С. Чемеринський, к. техн. н., доцент, В. О. Пінчук, д. техн. н., професор,  
Т. А. Шарабура, к. техн. н., доцент

## ВПЛИВ МІКРОХВИЛЬНОЇ АКТИВАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ЙОГО ПЕТРОГРАФІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»*

**Ключові слова:** вугілля, мікрохвильова активація, відбиття вітриніту, товщина пластичного шару, вихід летких речовин, стадія метаморфізму

**Вступ.** Вугілля є одним з основних джерел енергії у світі завдяки відносній доступності. Незважаючи на розвиток відновлюваних джерел [1–3], вугілля, як і раніше, займає важливе місце в енергетичному балансі багатьох країн, особливо тих, де його запаси великі. Використання вугілля в енергетиці має довгу історію і включає кілька ключових напрямів, кожен з яких має свої особливості та перспективи.

Відомо [4], що вугілля – це осадові горючі копалини, що складаються переважно з вуглецю, водню, кисню та невеликої кількості сірки та азоту. Вони утворюються в результаті тривалого розкладання та перетворення органічних залишків рослин під впливом тиску, температури та часу. Цей процес, званий вуглеутворенням, призводить до появи різного типу вугілля, що відрізняються хімічним складом, теплотворною здатністю та фізичними властивостями.

Так само відомо [5], що поліпшення теплотворних і структурних характеристик вугілля відбувається в процесі підвищення стадії метаморфізму і це робить їх більш затребуваними в різних галузях промисловості. У зв'язку з цим, останніми роками, активно досліджуються нові способи впливу на стадію метаморфізму, до яких можна віднести механічну, хімічну, каталітичну та мікрохвильову активацію [6–10]. Ці способи мають різні переваги і застосовуються залежно від необхідних властивостей і виду вугілля.

Мікрохвильова активація передбачає використання електромагнітних хвиль для нагріву вугілля. Цей метод заснований на здатності вугільного матеріалу поглинати мікрохвильове випромінювання та нагріватися зсередини [11–13]. На відміну від традиційного нагрівання, мікрохвильова обробка дозволяє рівномірно прогрівати матеріал та скорочувати час обробки, що, мабуть, може і прискорити процес метаморфізму. Отже, мета роботи – визначення потенційної можливості підвищення стадії метаморфізму вугілля з використанням мікрохвильової активації.

**Основна частина.** Для дослідження використано дослідні зразки вугілля різного ступеню метаморфізму (табл. 1) з крупністю 3–6 мм, які оброблялися у спеціальній мікрохвильовій печі з потужністю електромагнітного поля 750 Вт протягом 240 с. Оброблені зразки вугілля охолоджували до температури навколишнього середовища без доступу повітря.

Результати досліджень петрографічних характеристик, виходу летких речовин та товщини пластичного шару зразків вугілля з активацією та без наведено у табл. 2 та на рис. 1.

Таблиця 1 – Характеристика вугілля

Зразок вугілля	Показник відбиття вітриніту $R_0$ , %	Відповідність марки вугілля	Вихід легких речовин $V^{daf}$ , %	Товщина пластичного шару, $Y$ мм
1	0,72	Г	36,6	8
2	0,85	ГЖ	39,8	16
3	1,03	Ж	32,6	19
4	1,16	К	24,2	15
5	1,18	КЖ	26,1	17
6	1,55	ПС	17,9	10

Таблиця 2 – Петрографічні показники дослідних зразків вугілля

Зразок вугілля	Показник відбиття вітриніту $R_0$ , %	Стадії метаморфізму вітриніту та марки вугілля, що умовно відповідають цим стадіям, %					
		ДГ	Г	Ж	К	ПС	П
1	0,72	9,0	88,0	3,0	-	-	-
1*	0,73	10,0	86,0	4,0	-	-	-
2	0,85	-	75,0	19,0	6,0	-	-
2*	0,75	4,0	80,0	16,0	-	-	-
3	1,03	-	6,0	90,0	1,0	3,0	-
3*	0,99	-	16,0	84,0	-	-	-
4	1,16	-	2,0	49,0	49,0	-	-
4*	1,21	-	-	42,0	56,0	2,0	-
5	1,18	-	-	63,0	37,0	-	-
5*	1,22	-	-	27,0	70,0	3,0	-
6	1,55	-	-	2,0	5,0	88,0	5,0
6*	1,58	-	-	4,0	2,0	84,0	10,0

Примітка: \* – активоване вугілля в мікрохвильовому полі

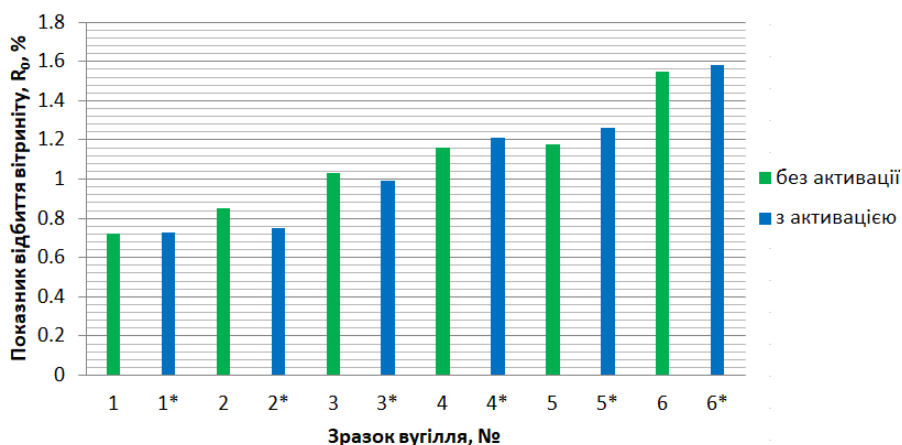


Рисунок 1 – Показник відбиття вітриніту дослідних зразків

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що ефект мікрохвильової активації проявляється більшою мірою у вугіллі високої стадії метаморфізму, ніж у низької. Наведені на рис. 1 данні дозволяють виділити дві характерні групи. Перша група відповідає вугіллю низької та середньої стадії метаморфізму з показником відбиття вітриніту  $R_0$  в діапазоні від 0,72 до 1,03 %. У цій групі спостерігається зниження величини  $R_0$  або незначне збільшення в межах похибки.

До другої групи можна віднести вугілля вищої стадії метаморфізму з показником відбиття вітриніту  $R_0$  в діапазоні від 1,16 до 1,55 %. З рисунку видно, що показник відбиття вітриніту вугілля високої стадії метаморфізму під впливом мікрохвильової активації підвищується. Вугілля з показником  $R_0$  більш 1,1 % у процесі активації виявляє, очевидно, тенденцію до підвищення стадії метаморфізму. Це пов'язано з перерозподілом вуглецю і водню. Процес активації супроводжується перегрупуванням неароматичного вуглецю у формі простих сполук та його ароматизацією внаслідок дегідрування насичених циклічних сполук. Новостворені ароматичні конденсовані сполуки, основою яких є ароматичний вуглець, групуються та конденсуються у вигляді кристалічних груп шляхом їхнього паралельного зближення. Цей ефект проявляється у підвищенні відбивної здатності вітриніту.

Отримані дані по стадії метаморфізму вітриніту та марки вугілля, що умовно відповідають цим стадіям, підтверджують висновки, що висунуті вище. Так, мікрохвильова активація малометаморфізованого вугілля з показником відбиття вітриніту  $R_0$  в діапазоні від 0,72 до 1,03 % проявляють тенденцію до зниження стадії метаморфізму, за рахунок зміни відбивної здатності вітриніту, характерної для молодшого вугілля, такого як ДГ і Г.

У свою чергу, вугілля вищої стадії метаморфізму з показником відбиття вітриніту  $R_0$  в діапазоні від 1,16 до 1,55 % проявляють тенденцію до підвищення стадії метаморфізму. Для цієї групи характерна зміна характеристик вугілля, що відповідає більш метаморфізованому вугіллю, такому як ПС та П.

Для оцінки впливу мікрохвильової активації на петрографічні властивості вугілля проведено дослідження щодо встановлення кількості виходу летких речовин та товщини пластичного шару. Отримані дані наведено на рис. 2, 3.

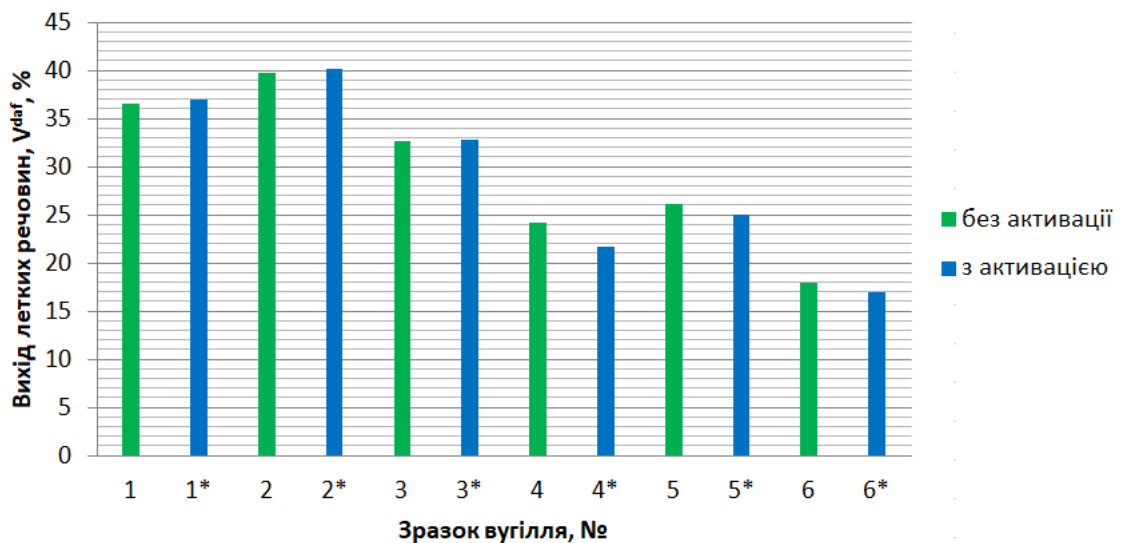


Рисунок 2 – Вихід летких речовин дослідних зразків

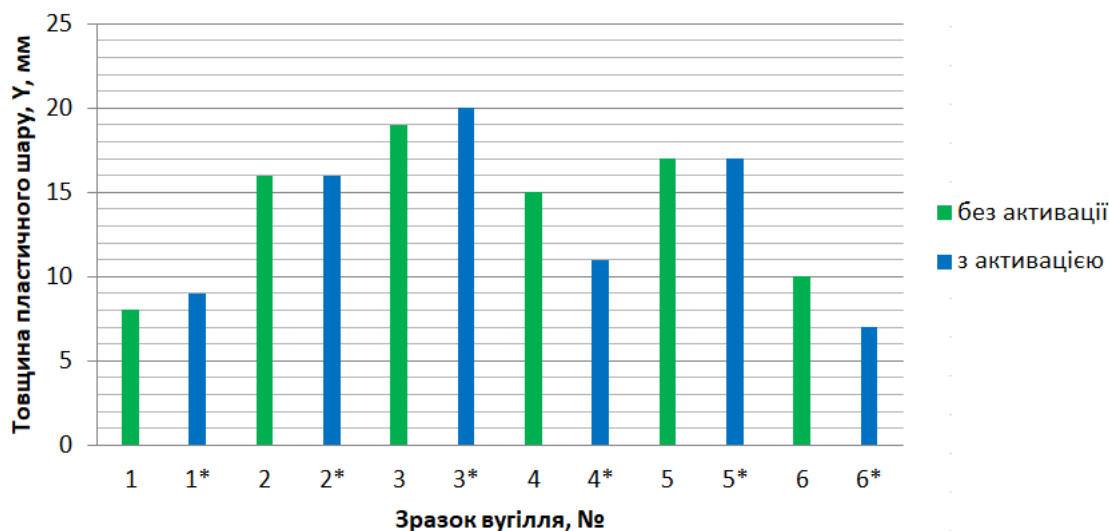


Рисунок 3 – Товщина пластичного шару дослідних зразків

Очевидно, що процес активації супроводжується розривом міжмолекулярних зв'язків і через обмежений час впливу, новоутворені низькомолекулярні фрагменти високомолекулярних сполук залишаються у вільному стані. Утворення таких фрагментів у процесі активації сприяє збільшенню виходу летких речовин із активованого вугілля (рис. 2). У зв'язку з цим термічна стійкість активованого вугілля першої групи (вугілля з  $R_0$  менш 1,03), знижується через наявність реакційноздатних низькомолекулярних сполук. Тому, можна охарактеризувати процес активації такого вугілля як зниження стадії метаморфізму.

Аналіз другої групи (вугілля з  $R_0$  більше 1,16 %) показує, що вугілля навпаки підвищує стадію метаморфізму. Наявність більшої кількості високомолекулярних сполук, що сприяє більш інтенсивному процесу активації з утворенням вищої температури всередині вугільних частинок, ніж у попередньої групи. У зв'язку з цим, витраченої енергії достатньо для того, щоб знов утворені вуглецеві сполуки сконденсувалися і утворили впорядковану високомолекулярну структуру. Даний факт впливає на зниження виходу летких речовин цієї групи вугілля (рис. 2). Процес мікрохвильової активації супроводжується реакціями відщеплення кисневмісних груп та розривом міжмолекулярних зв'язків з утворенням вільного водню. Перерозподіл водню відбувається між продуктами реакції.

Таким чином, вільні радикали, що утворюються, збагачуються воднем і утворюють речовини з меншою молекулярною масою, які формують пластичну масу. Тому перша група вугілля після мікрохвильової активації виявляє тенденцію до збільшення товщини пластичного шару (рис. 3), зважаючи на наявність низькомолекулярних речовин після мікрохвильової активації. Вугілля другої групи, зважаючи на наявність більшої кількості високомолекулярних сполук та більш сконденсованої ароматичної структури, пластичні властивості погіршують (рис. 3).

**Висновки.** В результаті досліджень встановлено, що при мікрохвильовій активації з потужністю електромагнітного поля 750 Вт протягом 240 с, спостерігається не однозначний вплив на характеристики зразків вугілля, а саме, вугілля, у якого до активації  $R_0$  більше 1,16, мікрохвильова активація проходить швидше, при цьому показник

відбиття вітриніту підвищується до 1,58 %, вихід летких речовин та товщина пластичного шару знижуються. Вугілля високої стадії метаморфізму активуються швидше, за рахунок більш щільної структури. Наявність вже більш упорядкованої структури, ніж у менш метаморфізованого вугілля, у процесі активації відбувається зближення конденсованих вуглецевих шарів, що в результаті і підвищує їхню стадію метаморфізму.

Навпаки, у вугілля у якого до активації  $R_0$  менше 1,03, мікрохвильова активація проходить повільніше, при цьому показник відбиття вітриніту знижується до 0,75 %, вихід летких речовин та товщина пластичного шару підвищуються. Очевидно, це пов'язано з тим, що вугілля низької стадії метаморфізму характеризуються менш щільною структурою і для його активації необхідно більше часу. Також, для підвищення стадії метаморфізму необхідно докласти більше енергії, щоб утворені радикали і структурні одиниці з'єдналися між собою і утворили упорядковану ароматичну структуру. Тому для вугілля низької стадії метаморфізму час активації має бути більшим.

Результати досліджень вказують на можливість зміни стадії метаморфізму вугілля, що надалі дозволить підвищити ефективність процесів переробки вугілля, скоротити енерговитрати та мінімізувати шкідливі викиди завдяки застосуванню мікрохвильових технологій. Крім того, використання мікрохвильової активації може дозволити розширити сировинну базу для різних вугільних технологій, особливо в умовах дефіциту палива. Однак, для встановлення закономірностей впливу мікрохвильової активації на фізико-хімічні властивості вугілля різної стадії метаморфізму необхідні подальші дослідження в більш широкому діапазоні параметрів активації.

#### Література

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за заг. ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 82 с.
2. Фрайер Е. Розвиток відновлювальної енергетики: досвід Східної Німеччини для України. Журнал європейської економіки. 2021. Т. 20. № 3. С. 464–483. [Електронний ресурс]. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jee\\_2021\\_20\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jee_2021_20_3_6).
3. Кучерява І.М., Сорокіна Н.Л. Відновлювана енергетика в світі та Україні станом на 2019 р. – початок 2020 р. Гідроенергетика України. 2020. № 1–2. С. 38–44.
4. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Кн. 1 : Від вогню та води до електрики / В. І. Бондаренко, Г. Б. Варламов, І. А. Вольчин та ін. К.: Фенікс. – 2013. – 263 с. – ISBN 966-7317-98-6.
5. Саранчук В.І., Ільяшов М.О., Ошовський В.В., Білецький В.С. // Основи хімії і фізики горючих копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – с. 640.
6. Вплив механічного подрібнення бурого вугілля Олександрійського родовища на його піроліз / В. Тамко [та ін.] // Донецький вісник Наукового товариства ім. Шевченка. Хімія. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2008. – Т. 21. – С. 97–103.
7. Тамаркіна Ю.В., Аніщенко В.М., Редько А.М., Кучеренко В.О. Адсорбційні властивості викопного вугілля, активованого гідроксидом калію. Вплив ступеня метаморфізму. Хімія, фізика та технологія поверхні. 2020. Т. 11, № 2. С. 175–189.
8. Sobolev, V.V., Rudakov, D.V., Molchanov, O.M., Stefanovych, L.I., & Kirillov, A.K. (2019). Physical and chemical transformations in gas coal samples influenced by the weak magnetic field. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 52–58.

9. Yuen F., Hameed B. Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Adv Colloid Interfase Sci.* 2009. Vol. 149, No. 1–2. P. 19–27.

10. Полянський О.С. Обґрунтування та розробка гнучкої технології виробництва твердого біопалива з рослинних та деревних відходів / О.С. Полянський, О.В. Дьяконов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2017. - Вип. 180. – С. 149–159.

11. Singh, S.; Gupta, D.; Jain, V.; Sharma, A.K. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A review. *Mater. Manuf. Process.* 2015, 30, 1–29.

12. Menéndez J.A., Arenillas A., Fidalgo B, Fernández Y., Zubizarreta L., Calvo E.G., Bermúdez J.M. Microwave heating processes involving carbon materials. *Fuel Proc. Tech.* 2010. Vol. 91, No. 1. P. 1–8.

13. Atwater J., Wheeler Jr. Temperature dependent complex permittivities of graphitized carbon blacks at microwave frequencies between 0.2 and 26 GHz. *J. Mater. Science.* 2004. Vol. 39. P. 151–157.

#### Bibliography (transliterated)

1. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi Ukrayiny / za zah. red. S.O. Kudri. – Kyiv: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NAN Ukrayiny, 2020. – 82 p.

2. Frayyer E. Rozvytok vidnovlyuval'noyi enerhetyky: dosvid Skhidnoyi Nimechchyny dlya Ukrayiny. *Zhurnal yevropeys'koyi ekonomiky.* 2021. T. 20. № 3. P. 464–483. [Elektronnyy resurs]. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/jee\\_2021\\_20\\_3\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/jee_2021_20_3_6).

3. Kucheryava I.M., Sorokina N.L. Vidnovlyuvana enerhetyka v sviti ta Ukrayini stanom na 2019 r. – pochatok 2020 r. *Hidroenerhetyka Ukrayiny.* 2020. № 1–2. P. 38–44.

4. Enerhetyka: istoriya, suchasnist' i maybutnye. Kn. 1 : Vid vohnyu ta vody do elektryky / V. I. Bondarenko, H. B. Varlamov, I. A. Vol'chyn ta in. K.: Feniks.– 2013.– 263 p. – ISBN 966-7317-98-6.

5. Saranchuk V.I., Il'yashov M.O., Oshovs'kyi V.V., Bilets'kyi V.S. // *Osnovy khimiyi i fizyky horyuchykh kopalyn.* – Donetsk: Skhidnyy vydavnychyy dim, 2008. – P. 640.

6. Vplyv mekhanichnoho podribnennya buroho vuhillya Oleksandriys'koho rodovyshcha na yoho piroliz / V. Tamko [ta in.] // *Donets'kyi visnyk Naukovoho tovarystva im. Shevchenka. Khimiya.* – Donetsk : Skhidnyy vydavnychyy dim, 2008.– T. 21.– P. 97–103.

7. Tamarkina Yu.V., Anishchenko V.M., Red'ko A.M., Kucherenko V.O. Adsorbtsiyni vlastyvoli vykopnoho vuhillya, aktyvovanoho hidroktydom kaliyu. Vplyv stupenya metamorfizmu. *Khimiya, fizyka ta tekhnolohiya poverkhni.* 2020. T. 11, № 2. P. 175–189.

8. Sobolev, V.V., Rudakov, D.V., Molchanov, O.M., Stefanovych, L.I., & Kirillov, A.K. (2019). Physical and chemical transformations in gas coal samples influenced by the weak magnetic field. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 52–58.

9. Yuen F., Hameed B. Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Adv Colloid Interfase Sci.* 2009. Vol. 149, No. 1–2. P. 19–27.

10. Polyans'kyy O.S. Obhruntuvannya ta rozrobka hnuchkoyi tekhnolohiyi vyrobnytstva tverdoho biopalyva z roslynnykh ta derevnykh vidkhodiv / O.S. Polyans'kyy, O.V. D'yakonov // Visnyk Kharkivs'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu sil's'koho hospodarstva imeni Petra Vasylenka. – 2017. – Vyp. 180. – P. 149–159.

11. Singh, S.; Gupta, D.; Jain, V.; Sharma, A.K. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A review. Mater. Manuf. Process. 2015, 30, 1–29.

12. Menéndez J.A., Arenillas A., Fidalgo B, Fernández Y., Zubizarreta L., Calvo E.G., Bermúdez J.M. Microwave heating processes involving carbon materials. Fuel Proc. Tech. 2010. Vol. 91, No. 1. P. 1–8.

13. Atwater J., Wheeler Jr. Temperature dependent complex permittivities of graphitized carbon blacks at microwave frequencies between 0.2 and 26 GHz. J. Mater. Science. 2004. Vol. 39. P. 151–157.

УДК 662.7

М. С. Чемеринський, к. техн. н., доцент, В. О. Пінчук, д. техн. н., професор,  
Т. А. Шарабура, к. техн. н., доцент

### ВПЛИВ МІКРОХВИЛЬОВОЇ АКТИВАЦІЇ ВУГІЛЛЯ НА ЙОГО ПЕТРОГРАФІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Незважаючи на розвиток відновлюваних джерел, вугілля займає важливе місце в енергетичному балансі багатьох країн, особливо тих, де його запаси великі. Одним із способів впливу на характеристики вугілля та додавання йому заданих властивостей є попередня його мікрохвильова активація.

В результаті досліджень встановлено, що при мікрохвильовій активації з потужністю електромагнітного поля 750 Вт протягом 240 с, спостерігається не однозначний вплив на характеристики зразків вугілля, а саме, вугілля, у якого до активації  $R_0$  більше 1,16, мікрохвильова активація проходить швидше, при цьому показник відбиття вітриніту підвищується до 1,58 %, вихід летких речовин та товщина пластичного шару знижуються. Вугілля високої стадії метаморфізму активуються швидше, за рахунок більш щільної структури. Наявність вже більш упорядкованої структури, ніж у менш метаморфізованого вугілля, у процесі активації відбувається зближення конденсованих вуглецевих шарів, що в результаті і підвищує їхню стадію метаморфізму.

Навпаки, у вугілля у якого до активації  $R_0$  менше 1,03, мікрохвильова активація проходить повільніше, при цьому показник відбиття вітриніту знижується до 0,75 %, вихід летких речовин та товщина пластичного шару підвищуються. Очевидно, це пов'язано з тим, що вугілля низької стадії метаморфізму характеризуються менш щільною структурою і для його активації необхідно більше часу. Також, для підвищення стадії метаморфізму необхідно докласти більше енергії, щоб утворені радикали і структурні одиниці з'єдналися між собою і утворили упорядковану ароматичну структуру. Тому для вугілля низької стадії метаморфізму час активації має бути більшим.

Результати досліджень вказують на можливість зміни стадії метаморфізму вугілля, що надалі дозволить підвищити ефективність процесів переробки вугілля, скоротити енерговитрати та мінімізувати шкідливі викиди завдяки застосуванню мікрохвильових технологій. Крім того, використання мікрохвильової активації може дозволити

розширити сировинну базу для різних вугільних технологій, особливо в умовах дефіциту палива.

**Ключові слова:** вугілля, мікрохвильова активація, відбиття вітриніту, товщина пластичного шару, вихід летких речовин, стадія метаморфізму.

M. S. Chemerynskyi, V. O. Pinchuk, T. A. Sharabura

## **INFLUENCE OF MICROWAVE ACTIVATION OF COAL ON ITS PETROGRAPHIC PROPERTIES**

Despite the development of renewable sources, coal occupies an important place in the energy balance of many countries, especially those with large reserves. One of the ways to influence the characteristics of coal and add specified properties to it is its preliminary microwave activation.

As a result of the studies, it was found that with microwave activation with an electromagnetic field power of 750 W for 240 s, an ambiguous effect on the characteristics of coal samples is observed, namely, coal with  $R_0$  greater than 1.16 before activation, microwave activation occurs faster, while the vitrinite reflectivity increases to 1.58 %, the yield of volatile substances and the thickness of the plastic layer decrease. Coals of a high stage of metamorphism are activated faster due to a denser structure. The presence of a more ordered structure than less metamorphosed coals, during the activation process, the condensed carbon layers come closer together, which ultimately increases their metamorphism stage.

On the contrary, for coal with  $R_0$  less than 1.03 before activation, microwave activation is slower, while the vitrinite reflectance index decreases to 0.75 %, the yield of volatile substances and the thickness of the plastic layer increase. Obviously, this is due to the fact that coal of a low metamorphism stage is characterized by a less dense structure and more time is needed for its activation. Also, to increase the metamorphism stage, it is necessary to apply more energy so that the formed radicals and structural units connect with each other and form an ordered aromatic structure. Therefore, for coals of a low metamorphism stage, the activation time should be longer.

The research results indicate the possibility of changing the coal metamorphism stage, which will increase the efficiency of coal processing processes, reduce energy costs and minimize harmful emissions due to the use of microwave technologies. In addition, the use of microwave activation can expand the raw material base for various coal technologies, especially in conditions of fuel shortage.

**Keywords:** coal, microwave activation, vitrinite reflection, plastic layer thickness, volatile matter yield, metamorphism stage.



Ю. А. Селіхов, к. техн. н., професор, К. О. Горбунов, к. техн. н., професор,  
Г. В. Пономаренко, к. техн. н., доцент, Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант,  
В. Г. Рись, аспірант

## ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЕРХНІ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків*

**Ключові слова:** термічна взаємодія, високотемпературна поверхня, граничні умови теплообміну, достовірність результатів, метод фізичного моделювання, коректність розв'язання задачі, метод експериментального визначення локальних умов теплообміну, ідентифікація граничних умов теплообміну, зворотне завдання теплопровідності.

**Постановка задачі.** Відповідно до сучасного стану наукових відомостей про процес термічної взаємодії розпиленої рідини з високотемпературною поверхнею [1, 2], єдино можливим в даний час методом визначення граничних умов теплообміну, що забезпечує достовірність результатів, є метод фізичного моделювання. Тому коректність вирішення завдань, поставлених та сформульованих визначається обґрунтованістю вибору методу експериментального визначення локальних умов теплообміну. Аналіз можливих варіантів вирішення дозволив зробити вибір на користь методу ідентифікації граничних умов теплообміну шляхом вирішення оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ) [3].

Як відомо [4–6] найдостовірніші результати при вирішенні ОЗТ можна отримати при одномірному температурному полі. Тому для дослідження теплообміну необхідно сконструювати і виготовити спеціальний термозонд з матеріалу з високим коефіцієнтом теплопровідності, бічна поверхня і один торець якого теплоізолювані, а охолодження здійснюється з поверхні другого торця (цю поверхню називатимемо робочою) [6].

Очевидно, що правомірність припущення про одномірність температурного поля визначається не лише значенням коефіцієнта теплопровідності матеріалу термозонда та низькою інтенсивністю теплообміну на його бічній поверхні, а й ступенем зміни густини зрошення в межах робочої поверхні термозонда. Додатковою вимогою до форми термозонда та форми елементів, що входять до конструкції вимірювального блоку, повинна бути їх гранична простота. Виконання цієї вимоги дозволить не тільки забезпечити більш точне рішення ОЗТ, але і більш точно оцінити розрахунковим шляхом можливі похибки у визначенні граничних умов, що шукаються, викликані відхиленням реальних особливостей теплообміну елементів конструкції термозонда від передбачуваних при розрахунковому відновленні коефіцієнтів тепловіддачі або щільності теплового потоку.

Попередні розрахунки показали, що за коефіцієнтів тепловіддачі 32 кВт/(м<sup>2</sup>с), швидкість зниження температури поверхні, що охолоджується розпиленою рідиною, може перевищувати 100 градусів за секунду. У зв'язку з цим, крім необхідності засто-

сування малоінерційних датчиків температури, виникає необхідність використання сучасної швидкодіючої апаратури для вимірювання термоЕРС. Представлені міркування є опорними даними як для розробки конструкції термозонда і виборі вторинної вимірювальної апаратури, так і для формування методики проведення дослідів і обробці їх результатів.

**Мета статті.** Розробити методику проведення дослідів та опрацювання їх результатів. Якщо ми візьмемо діаметр стрижня тепломіра 30 мм, коефіцієнт теплопровідності міді порядку 360 Вт/(мК) та інтенсивності теплообміну на бічній, ізольованій його поверхні, що не перевищує 10 Вт/(м<sup>2</sup>К), критерій Ві становить менше 10<sup>-3</sup>. Як відомо [7, 8], така оцінка є достатньою основою для того, щоб температурне поле стрижня тепломіра можна вважати одновимірним. Відповідно до цього, процес теплопровідності стрижня термозонда описується системою рівнянь [7]:

$$C_v(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(t) \cdot \frac{\partial t}{\partial x} \right]; \quad (1)$$

$$t(x, 0) = f(x); \quad (2)$$

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (3)$$

$$t(x_1, \tau) = \varphi(\tau), \quad (4)$$

де  $\varphi(\tau)$  – виміряне значення температури в точці з координатою  $x_1$ .

Розподіл температури в стрижні наприкінці процесу його нагрівання і після деякої витримки стає рівномірним, тобто мідь має високу теплопровідність. Надалі при обчисленні температурних полів початкове розподілення температури приймається рівномірним:

$$t(x, 0) = t_0 = \text{const.} \quad (5)$$

Теплоємність та коефіцієнт теплопровідності матеріалу стрижня приймаються за довідковими даними [9, 10]:

$$C_v(t) = 3,45 \cdot 10^6 + 720 \cdot t; \quad (6)$$

$$\lambda(t) = 387 - 0,056 \cdot t. \quad (7)$$

Як зазначалося вище, величина теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на робочому торці стрижня термозонда при охолодженні його рідиною будуть визначатися в результаті рішення ОЗТ. Це рішення виконуватиметься прямим методом, яке реалі-

зація здійснюватиметься чисельним способом. Застосування прямого методу рішення ЗЗТ, коли експериментально знайдена зміна температури в часі в окремій точці зразка безпосередньо використовується у вихідних рівняннях математичної моделі або в їх рішеннях, передбачає ретельну обробку первинних даних з метою усунення випадкових помилок вимірів та дешифрування. Згладжування результатів спостережень повинно проводитися методом найменших квадратів та методом кусочно-поліноміальної апроксимації [9].

Визначення температурного поля стрижня повинно виконуватися чисельним способом за явною кінцевою схемою. Ця схема була обрана тому, що умови теплообміну при охолодженні високотемпературної поверхні диспергованою водою змінюються дуже значно через швидкий перехід від одного режиму кипіння води до іншого і для того, щоб у рішеннях відобразити ці зміни доводиться брати малі тимчасові кроки. В цих умовах зручним є саме явний звичайно різницевий метод розрахунку [11, 12]. При цьому температура у внутрішніх точках стрижня визначається співвідношенням, отриманим (1):

$$t_i^{k+1} = t_i^k \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot Fo_i}{\delta_i}\right) + t_{i-1}^k \cdot \frac{2 \cdot Fo_i}{1 + \delta_i} \left(\delta_i + \frac{2 \cdot j_i}{1 + \delta_i}\right) + t_{i+1}^k \cdot \frac{2 \cdot Fo_i}{1 + \delta_i} \left(1 - \frac{2 \cdot j_i}{1 + \delta_i}\right), \quad (8)$$

де  $Fo_i = \lambda_i \cdot \Delta\tau / C_{Vi} \cdot h_i^2 \leq 0,5 \cdot \delta_i$ ;  $h_i$  – крок за координатою,

$$j_i = (\lambda_{i+1} - \lambda_{i-1}) / 4 \cdot \lambda_i; \delta = h_{i+1} / h_i; i = 1, 2, 3 \dots N-2.$$

У вузол сітки  $N-1$  вміщено точку вимірювання температури.

При малих просторових кроках інтегрування вплив параметру  $j$  для стрижнів з міді дуже мало і його значення може бути прийнято рівним нулю. Температура на ізолюваному торці стрижня визначається за умов відсутності теплообміну на цій поверхні. Маючи на увазі (3) і, використовуючи просторову похідну у другому наближенні [13, 14], отримаємо:

$$t_0^{k+1} = (t_1^{k+1} + t_0^k / 2 \cdot Fo_1) / (1 + 1/2 \cdot Fo_1). \quad (9)$$

Температура на робочій поверхні стрижня термозонда у точці  $N$  визначається шляхом перерахунку. Рівняння (8) для точки  $N-1$  у момент часу  $k+2$  за умови, що сітка рівнокрокова, запишеться у вигляді:

$$t_{N-1}^{k+2} = t_{N-1}^{k+1} \cdot (1 - 2 \cdot Fo_{N-1}) + Fo_{N-1} \cdot (t_N^{k+1} + t_{N-2}^{k+1}), \quad (10)$$

звідки

$$t_N^{k+1} = t_{N-1}^{k+2} \cdot \frac{1}{Fo_{N-1}} - t_{N-1}^{k+1} \cdot \left(\frac{1}{Fo_{N-1}} - 2\right) - t_{N-2}^{k+1}. \quad (11)$$

Визначення теплового потоку за відомим температурним полем, обчисленим за тією чи іншою схемою, зводиться до отримання похідної від температури за координатою для точок, що лежать на торцевій поверхні стрижня термозонда. Похідна за координатою, апроксимована кінцевими різницями з похибкою другого порядку, визначається наступним виразом:

$$\left(t_N^k\right)' = -\left[t_{n-1}^k - t_N^k + \left(t_N^{k-1} - t_N^k\right) / 2 \cdot Fo_N\right] / h_N. \quad (12)$$

За виконання розрахунків вираз (12) має бути перевірено формулою чисельного диференціювання, заснованої на багаточлені Лагранжа [15 – 17]. Порівняння похідних, обчислених за обома схемами, покаже, що їх значення відрізняються один від одного не більше ніж 1-2%.

Значення теплових потоків та коефіцієнтів тепловіддачі на робочій поверхні стрижня термозонда для процесу охолодження повинні визначатися за відомими співвідношеннями:

$$q_N^k = -\lambda_N \cdot \left(t_N^k\right)', \quad (13)$$

$$\alpha_k = q_N^k / \left(t_N^k - t_c\right), \quad (14)$$

де  $t_c$  – температура охолоджувальної рідини.

**Висновок.** Розроблено математичну модель визначення температурного поля стрижня термозонда. Величина теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на робочому торці стрижня термозонда при охолодженні його рідиною визначатиметься в результаті рішення ОЗТ. Саме рішення виконуватиметься прямим методом, яке реалізація здійснюватиметься чисельним способом.

#### Література

1. Селіхов Ю.А., Рищенко І.М., Горбунов К.О., Нагорний Е.Р. Інтеграція теплообміну високотемпературної поверхні // Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЕ». – 2024.– №3. С. 3–11.
2. Селіхов Ю.А., Горбунов К.О., Школьнікова Т.В., Пільник І.В. Методика експериментального дослідження локальних умов нестационарного теплообміну // Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЕ». – 2024.– №3. С. 12–19.
3. Селіхов Ю.А., Миронов А.М., Горбунов К.О., Рись В.Г. Експериментальний стенд для дослідження локальних умов нестационарного теплообміну // Інтегровані технології та енергозбереження «ІТЕ». – 2024.– №3. С. 43–51.
4. Темкин А.Г. Обратные методы теплопроводности. – М.: Энергия, 1973.– 464 с.
5. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. – С.: Машиностроение, 1979. – 216 с.
6. Мацевитый Ю.М., Мултановский А.В. Идентификация в задачах теплопроводности. – Киев: Наукова думка, 1982. – 249 с.

7. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.-Л.: ГИГТЛ, 1952. – 599 с.
8. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева и П.Д. Лебедева. – М.: Энергия, 1976, т. 2. – 896 с.
9. Березин В.С., Жидков Н.П. Методы вычислений. – М.: Физматгиз, 1962, т. 1. – 464 с.
10. Коздоба Л.А., Круковский П.Г. Методы решения обратных задач теплопереноса. – Киев: Наукова думка, 1982. – 360 с.
11. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. – М.: Мир, 1977. – 346 с.
12. Зенкевич О.Н. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 420 с.
13. Обэн Ж.П. Приближенное решение эллиптических краевых задач. – М.: Мир, 1977. – 320 с.
14. Розин Л.А. Основы метода конечных элементов в теории упругости. Л.: Изд-во ЛПИ, 1972. – 264 с.
15. Постнов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. – М.: Судостроение, 1974. – 286 с.
16. Кабанихин, С.И. Обратные и некорректные задачи / С.И. Кабанихин. – Новосибирск : Сиб. науч. изд-во, 2009. – 458 с.
17. Кузнецов, Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности : учеб. пособие / Г.В. Кузнецов, М.А. Шеремет. – Томск : Изд-во Томск. политехн. ун-та, 2007. – 172 с.

Bibliography (transliterated)

1. Selihov Yu.A., Rischenko I.M., Gorbunov K.O., Nagorniy E.R. Integratsiya teploobminu visokotemperaturnoyi poverhni // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya «ІТЕ». – 2024.– #3. P. 3–11.
2. Selihov Yu.A., Gorbunov K.O., Shkolnikova T.V., Pilnik I.V. Metodika eksperimentalnogo doslidzhennya lokalnih umov nestatsionarnogo teploobminu // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya «ІТЕ». – 2024.– #3. P. 12–19.
3. Selihov Yu.A., Mironov A.M., Gorbunov K.O., Ris V.G. Eksperimentalniy stand dlya doslidzhennya lokalnih umov nestatsionarnogo teploobminu // Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya «ІТЕ». – 2024.– #3. P. 43–51.
4. Temkin A.G. Obratnyie metodyi teploprovodnosti. – М.: Energiya, 1973.– 464 p.
5. Alifanov O.M. Identifikatsiya protsessov teploobmena letatelnyih apparatov. – S.: Mashinostroenie, 1979. – 216 p.
6. Matsevityiy Yu.M., Multanovskiy A.V. Identifikatsiya v zadachahteploprovodnosti. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 249 p.
7. Lyikov A.V. Teoriya teploprovodnosti. – М.-L.: GIGTL, 1952. – 599 p.
8. Teplotekhnicheskiiy spravochnik / Pod red. V.N. Yureneva i P.D. Lebedeva. – М.: Energiya, 1976, t. 2. – 896 p.
9. Berezin V.S., Zhidkov N.P. Metodyi vyichisleniy.– М.: Fizmatgiz, 1962, t. 1.– 464 p.
10. Kozdoba L.A., Krukovskiy P.G. Metodyi resheniya obratnyih zadach teploperenosu. – Kiev: Naukova dumka, 1982. – 360 p.

11. Streng G., Fiks Dzh. Teoriya metoda konechnyih elementov. – М.: Mir, 1977. – 346 p.
12. Zenkevich O.N. Metod konechnyih elementov v tehnikе.– М.: Mir, 1975.– 420 p.
13. Oben Zh.P. Priblizhennoe reshenie ellipticheskikh kraevyih zadach. –М.: Mir, 1977. – 320 p.
14. Rozin L.A. Osnovy metoda konechnyih elementov v teorii uprugosti. L.: Izd-vo LPI, 1972. – 264 p.
15. Postnov V.A., Harhurim I.Ya. Metod konechnyih elementov v raschetah sudovyih konstruktsiy. – М.: Sudostroenie, 1974. – 286 p.
16. Kabanihin, S.I. Obratnyie i nekorrektnyie zadachi / S.I. Kabanihin. – Novosibirsk : Sib. nauch. izd-vo, 2009. – 458 p.
17. Kuznetsov, G.V. Raznostnyie metodyi resheniya zadach teploprovodnosti : ucheb. posobie / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet.– Tomsk : Izd-vo Tomsk. politehn. in-ta, 2007.– 172 p.

УДК 621.016

Ю. А. Селіхов, к. техн. н., професор, К. О. Горбунов, к. техн. н., професор,  
Г. В. Пономаренко, к. техн. н., доцент, Е. Р. Нагорний, аспірант, І. В. Пільник, аспірант,  
В. Г. Рись, аспірант

### **ВИЗНАЧЕННЯ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ПОВЕРХНІ**

Рішення обернених задач теплопровідності для ідентифікації параметрів математичних моделей має особливе значення для забезпечення адекватності цих моделей за наявності експериментальної інформації про досліджуваний тепловий процес. Ефективність прийнятих рішень під час проектування різного енергетичного устаткування залежить як від глибини та достовірності знань явищ теплообміну, так і від адекватності моделювання різних теплофізичних процесів. З метою створення ефективних методів діагностики та ідентифікації таких процесів проводяться експериментальні дослідження та опрацювання їх результатів. В основу цих методів можуть бути покладені рішення обернених задач теплопровідності як для однорідних, так і для композитних середовищ. У даній роботі представлена математична модель визначення температурного поля спеціально розробленого стрижня термозонда та методика вирішення граничної оберненої задачі теплопровідності (ОЗТ), яка зводиться до визначення теплових потоків та коефіцієнтів тепловіддачі за даними експериментальних вимірювань температур в одній або кількох внутрішніх точках. Величина теплового потоку та коефіцієнта тепловіддачі на робочому торці стрижня термозонда при охолодженні його рідиною визначатиметься в результаті рішення ОЗТ. Саме рішення виконуватиметься прямим методом, а його реалізація здійснюватиметься чисельним способом.

**Ключові слова:** термічна взаємодія, високотемпературна поверхня, граничні умови теплообміну, достовірність результатів, метод фізичного моделювання, коректність розв'язання задачі, метод експериментального визначення локальних умов теплообміну, ідентифікація граничних умов теплообміну, зворотне завдання теплопровідності.

Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov, G. V. Ponomarenko, E. R. Nagorniy, I. V. Pilnyk,  
V. G. Ris

### DETERMINATION OF HEAT TRANSFER CONDITIONS WHEN COOLING A HIGH-TEMPERATURE SURFACE

The solution of inverse heat conduction problems for the identification of parameters of mathematical models is of particular importance for ensuring the adequacy of these models in the presence of experimental information about the thermal process under study. The effectiveness of decisions made when designing various power equipment depends both on the depth and reliability of knowledge of heat exchange phenomena and on the adequacy of modeling various thermophysical processes. In order to create effective methods for diagnosing and identifying such processes, experimental studies are conducted and their results are processed. These methods can be based on solutions of inverse problems of heat conduction for both homogeneous and composite media. In some cases, methods for solving inverse problems are the only means of obtaining the necessary information about the object under study. This paper presents a mathematical model for determining the temperature field of a specially designed thermal probe rod and a method for solving the boundary inverse problem of thermal conductivity (BIP), which is reduced to determining heat flows and heat transfer coefficients based on experimental temperature measurements at one or more internal points. The value of the heat flow and the heat transfer coefficient at the working end of the thermoprobe rod when it is cooled by liquid will be determined as a result of solving the OZT. The solution itself will be performed by a direct method, and its implementation will be carried out numerically.

**Keywords:** thermal interaction, high-temperature surface, boundary conditions of heat transfer, reliability of results, physical modeling method, correctness of the problem solution, method of experimental determination of local conditions of heat transfer, identification of boundary conditions of heat transfer, inverse problem of heat conduction.

А. Ю. Масікевич<sup>1</sup>, д. техн. н., професор, В. В. Лебедев<sup>2</sup>, к. техн. н., доцент,  
К. О. Горбунов<sup>2</sup>, к. техн. н., доцент, В. Ф. Моїсєєв<sup>2</sup>, к. техн. н., професор

## СУЧАСНІ ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ МЕДИЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ В ОБЛАСТІ БЕЗПЕКОВИХ ДИСЦИПЛІН ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

<sup>1</sup> Буковинський державний медичний університет

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Ключові слова:** екологічна безпека, енергозбереження, технології навчання, інновації

**Вступ.** Серед безпекових дисциплін, що входять до програми навчання студентів медичних спеціальностей та забезпечують вивчення небезпек, їх наслідків впливу на організм людини, забезпечення здорових та безпечних умов життя, особливе місце належить навчальним дисциплінам «Безпека життєдіяльності», «Охорона праці в галузі» та «Гігієна з основами екології» [1, 2]. Намічене збільшення валового внутрішнього продукту вимагає все більшого споживання паливно-енергетичних ресурсів [3]. Наявність «вільної та доступної енергії» стає для економіки сучасних країн такою самою необхідністю, як наявність повітря для людини. Нині поліпшення ефективності споживання енергії стає найдешевшим, швидкокомтованим і екологічним «джерелом енергії» [4]. Професійні кадри, які реалізовуватимуть «екологічну і енергетичну революцію» у найближчі 20–30 років, є безпосереднім фундаментом забезпечення екологічної і енергетичної безпеки в Україні, виховувати та готувати які потрібно вже зараз. Очевидно, що підготовка таких кадрів має використовувати поряд із сучасним обладнанням також сучасні технології та підходи у навчанні, які дозволять майбутнім спеціалістам швидше орієнтуватися у колосальному потоці інформації та бути мобільнішими та відкритими для впровадження перспективних безпекових та енергозберігаючих технологій. При цьому, завдання максимально використати нашу основну конкурентну перевагу – інтелектуальний потенціал – при переході на інноваційний шлях розвитку є актуальним. Розуміння майбутньої екологічної і енергетичної ситуації, майбутніх потреб суспільства та готовність до реалізації «розумної промисловості і енергетики» для майбутніх професіоналів є одними з найважливіших.

Метою статті є вивчення сучасних та інноваційних технологій навчання в області екологічної безпеки, енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності.

Методологічну основу дослідження статті складають ідеї філософії та психології про професійну діяльність, а також методологічні підходи в освіті в сфері безпеки життєдіяльності на робочому місці, екологічної безпеки та енергозбереження: системний, компетентнісний, діяльнісний, акмеологічний. Дизайн дослідження спирався на теорію моделювання спеціаліста, теоретичні основи формування структури та змісту професійної освіти та загальну концепцію безпекової підготовки студентів-медиків та викладання дисциплін, пов'язаних з тематикою екологічної безпеки та енергозбереження. Методологічна база дослідження базувалася на концепції сталого розвитку та принципах екологічної безпеки та енергозбереження, положення Хью Брудтланда при визначенні завдань концепції сталого розвитку [5].



**Обговорення результатів.** Спочатку важливо відзначити світоглядну основу та цілепокладання безпекової підготовки студентів-медиків в аспекті парадигми переходу від хімізації господарства до екологічних «зелених» технологій і енергозбереження. Широко відомі дванадцять принципів зеленої хімії, сформульованих Анастасом та Уорнером [3–5]. Вони належать до будь-якого виробництва, пов'язаного з використанням хімічних процесів. Вважаємо, що принципи зеленої хімії та сталої екологічної безпеки повинні лежати в основі світоглядної концепції взаємодії з природними ресурсами в ході будь-якого виробництва. Одним з перших завдань, що постають під час реалізації екологічної безпеки та енергозбереження – це просвітницька робота та підготовка кадрів, здатних до грамотного осмислення, розробки та реалізації цієї ідеї у подальшій професійній діяльності. З перших курсів, незалежно від напрямку підготовки, у навчальних закладах навчають культурології, філософії, екології, «закладають» математичний апарат, але нинішній період характеризується «ерою споживання» та для формування сучасного розуміння необхідно крім виховання культури спілкування також виховувати «культуру споживання» або «культуру енергозбереження». При цьому пізнавати енергозбереження необхідно всім шарам населення, навіть не пов'язаним з енергетикою, оскільки саме енергоефективне мислення в кінцевому результаті може призвести до вивільнення величезної кількості енергії. У зв'язку з цим у навчальні плани багатьох напрямів навчання вводяться дисципліни пов'язані з енергозбереженням [6–8].

Незважаючи на те, що багато українських університетів є лідерами у наукових розробках, пов'язаних із підвищенням енергоефективності, в освітній діяльності цей потенціал використовується в основному тільки в процесі підвищення кваліфікації керівників та спеціалістів підприємств. Однак студенти, що навчаються у вищих навчальних закладах, – це одна з самих складних категорій жителів нашої країни, для яких енергозбереження є відірваною від реальності наукою. Розкривати питання про необхідність берегти енергію необхідно разом зі студентами, поступово підводячи їх до усвідомлення того, що раціонально споживати та берегти – це ознака освіченості та турботи про своє майбутнє та здоров'я нації [9–10]. Потреба в екологічній безпеці та енергозбереженні повинна прийти в результаті поступового розуміння необхідності цього процесу та важливості ролі індивіда в цьому процесі, і в жодному випадку не повинна бути нав'язана студенту законами, постановами і тощо. Створити в Україні «екологічно безпечне, здорове та енергоефективне суспільство» це завдання не на рік чи два, це завдання на десятки років [11–12]. Тому виховувати культуру екологічної безпеки та енергозбереження необхідно з самих ранніх років.

Основна проблема створення якісного навчання в сфері екологічної безпеки та енергозбереження – це трансформація знань у стрімко мінливих технологіях у сфері енергоефективного обладнання та методи енергозбереження. Саме тому при реалізації навчання студентів-медиків необхідно підвищити якість освіти шляхом створення інноваційної системи підготовки на основі акцентованого навчання за темами, які є найбільш актуальними в області екологічної безпеки та енергозбереження для різних напрямків, уникаючи при цьому зайвої інформації, яку студент-медик повинен отримувати самостійно. Для вирішення цього системного завдання необхідно у навчальному процесі реалізовувати сучасні освітні технології [6]:

– активні та інтерактивні форми проведення занять: дискусії у діалоговому режимі; комп'ютерні симуляції; ділові ігри; розбір реальних ситуацій та проєктів; групових обговорень результатів студентської дослідницької діяльності; міжвузівські телеконференції;

- психологічні тренінги, спрямовані на подолання внутрішніх бар'єрів пов'язаних із впровадженням інновацій у сфері безпеки життєдіяльності, створення оптимальних умов праці та екологічно безпечного та енергоефективного виробництва;
- проведення внутрішніх заходів із залученням громадськості та фахівців, присвячених пропаганді енергозбереження;
- підготовку сучасних освітніх програм для різних спеціальностей та напрямків з екологічної безпеки та енергозбереження;
- використовувати лабораторії різних напрямів або створювати міжкафедральні або міжфакультетські наукові лабораторії в сфері екологічної безпеки та енергозбереження.

Для ефективного формування компетенцій з напряму навчання було визначено когнітивні цілі управління професійною підготовкою щодо формування основ екологічної безпеки та енергозбереження у студентів-медиків.

Когнітивні цілі спрямовані на [5]:

- створення освітніх умов у ході професійної підготовки студентів щодо освоєння знань екологічної безпеки та енергозбереження;
- освоєння студентами-медиками встановлених компетенцій екологічної безпеки та енергозбереження, а також застосування студентами-медиками умінь використовувати вивчений зміст за умов професійної діяльності;
- формування умінь проектно-дослідницької діяльності у сфері безпеки життєдіяльності на робочому місці;
- формування у студентів-медиків умінь аналізу сфери екологічної небезпеки та неефективного енергозбереження (розбивати матеріал, що вивчається, на складові, виділяти його структуру, взаємозв'язки між окремими елементами виділеної структури);
- застосування умінь синтезу у навчальній та майбутній професійній діяльності для попередження ризиків (комбінувати будь-які елементи, щоб отримувати єдине ціле).

Для досягнення визначених когнітивних цілей пропонується застосування таких інноваційних технологій навчання [3–6]:

- технології постановки ситуаційної та кейс-завдання: використання методу вирішення конкретних проблем екологічної безпеки та енергозбереження.
- технології висування гіпотез та обґрунтування обраного шляху вирішення проблеми з використанням методу мінімаксу. Даний метод є дидактичним методом, заснованим на вирішенні фізико-математичних та інженерно-екологічних завдань з обґрунтуванням усіх шляхів вирішення, а також на поясненні кожного кроку (алгоритму) вирішення задачі для аргументації правильності обраного шляху вирішення даного завдання;
- технології проектно-аналітичного аналізу з використанням методу хакатону. Метод хакатону є безумовно структурованою проектно-аналітичною діяльністю студентів. Проектно-аналітична діяльність - це діяльність з вивчення, дослідження, аналізу та подання рішень (продукту діяльності) з заданої проблеми/завдання/ідеї. Метод хакатону має на увазі розподіл ролей учасників. Так, викладач виступає у ролі модератора освітнього процесу під час хакатона, а студенти приміряють різні ролі: експерта, замовника, розробника завдання/проблеми/ідеї, інженера-конструктора, експерта-еколога, лікаря та інших.

Реалізація визначених сучасних та інноваційних технологій навчання в області безпеки життєдіяльності, енергозбереження, енергетичної ефективності дозволить знанням самим «втягнутися», студент-медик буде вбирати інформацію про екологічну безпеку та набувати енергозберігаюче мислення і звички. При цьому він навчиться найголовнішого – розуміти до чого веде неефективне споживання ресурсів, які ризики для здоров'я людини виникають при цьому. Створення інноваційної системи підготовки дозволить студентам поступово освоїти основи екологічної безпеки і енергозбереження та навчиться застосовувати сучасні технології підвищення енергоефективності у своїй сфері діяльності та у побуті.

**Висновки.** Таким чином, в статті дослідженні основні сучасні та інноваційні технології навчання в області безпеки життєдіяльності, енергозбереження та екологічної безпеки. Показано, що при реалізації освіти студентів-медиків необхідно підвищити якість освіти шляхом створення інноваційної системи підготовки на основі акцентованого навчання за темами, які є найбільш актуальними в області екологічної безпеки та енергозбереження для різних напрямків, уникаючи при цьому зайвої інформації, яку студент-медик повинен отримувати самостійно. Для вирішення цього системного завдання необхідно у навчальному процесі реалізовувати сучасні освітні технології. Для ефективного формування компетенцій з напряму навчання було визначено когнітивні цілі управління професійною підготовкою щодо формування основ екологічної безпеки та енергозбереження у студентів-медиків. Для досягнення визначених когнітивних цілей пропонується застосування таких інноваційних технологій навчання: технології постановки ситуаційної та кейс-завдання, технології висування гіпотез та обґрунтування обраного шляху вирішення проблеми з використанням методу мінімаксу, технології проектно-аналітичного аналізу з використанням методу хакатону.

#### Література

1. Ablicieva I.Yu. Occupational Safety: Lecture notes for English-speaking students of faculty ELIT all forms of training. – Sumy: Sumy State University, 2018. – 111 p.
2. Vasylyv N., Kryvenko G. Life Safety and Civil Protection: practical course. – Ivano-Frankivsk : IFNTUOG, 2019. – 108 p.
3. Каленський А. Методологічні підходи до стандартизації змісту професійної освіти // Науковий вісник Інституту професійно-технічної освіти НАПН України. Професійна педагогіка. – 2018. – №16. – С. 27–33.
4. Каленський А.А. Концептуальні засади екоорієнтованих педагогічних технологій у професійній (професійно-технічній) освіті // Вісник Глухівського національного педагогічного університету імені Олександра Довженка. Серія: педагогічні науки. – 2022. – №48. – С. 87–94.
5. Лук'янова Л.Б. Впровадження сучасної технології екологічних знань у ПТНЗ // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2003. – №3. – С. 230–235.
6. Лук'янова Л.Б. Методологічне осмислення змісту екологічної освіти // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2004. – №6. – С.115–122.

7. Носа А.М. Особливості формування, розвитку та здійснення спільної екологічної політики Європейського Союзу як інструменту забезпечення екологічної безпеки світового співтовариства // Науковий вісник Ужгородського національного університету. – 2017. – №13. – С. 56–61.

8. Швед М. Тенденції розвитку зарубіжної екологічної освіти // Вісник Львівського ун-ту. Серія педагогічна. – 2003. – №17. – С. 167–174.

9. Кіндратець О.М. Формування суспільства сталого розвитку: проблеми і перспективи. Наукова монографія. Вид-во ЗДІА, 2003. – 383с.

10. Підліснюк В., Рудик І., Кириленко В., Вишенська І., Маслюківська О. Сталий розвиток суспільства: роль освіти: путівник К.: Вид-во СПД «Ковальчук, 2005. – 22 с.

11. Висоцька О. Є. Освіта для сталого розвитку: науково-методичний посібник. – Дніпропетровськ: Роял Принт, 2011. – 200 с.

12. Ващука Ф.Г. Інтеграція в європейський освітній простір: здобутки, проблеми, перспективи. – Ужгород: ЗакДУ, 2011. – 560 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Ablieieva I.Yu. Occupational Safety: Lecture notes for English-speaking students of faculty ELIT all forms of training. – Sumy: Sumy State University, 2018. – 111 p.

2. Vasylyv N., Kryvenko G. Life Safety and Civil Protection: practical course. – Ivano-Frankivsk : IFNTUOG, 2019. – 108 p.

3. Kalenskyi A. Metodolohichni pidkhody do standartyzatsii zmistu profesiinoi osvity // Naukovyi visnyk Instytutu profesiino-tekhnichnoi osvity NAPN Ukrainy. Profesiina pedahohika. – 2018. – №16. – P. 27–33.

4. Kalenskyi A.A. Kontseptualni zasady ekooriientovanykh pedahohichnykh tekhnolohii u profesiinii (profesiino-tekhnichnii) osviti // Visnyk Hlukhivskoho natsionalnoho pedahohichnoho universytetu imeni Oleksandra Dovzhenka. Serii: pedahohichni nauky. – 2022. – №48. – P. 87–94.

5. Luk'ianova L.B. Vprovadzhennia suchasnoi tekhnolohii ekolohichnykh znan u PTNZ // Suchasni informatsiini tekhnolohii ta innovatsiini metodyky navchannia u pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiia, teoriia, dosvid, problemy. – 2003. – №3. – P. 230–235.

6. Luk'ianova L.B. Metodolohichne osmyslennia zmistu ekolohichnoi osvity // Suchasni informatsiini tekhnolohii ta innovatsiini metodyky navchannia v pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiia, teoriia, dosvid, problemy. – 2004. – №6. – P.115–122.

7. Nosa A.M. Osoblyvosti formuvannia, rozvytku ta zdiisnennia spilnoi ekolohichnoi polityky Yevropeiskoho Soiuzu yak instrumentu zabezpechennia ekolohichnoi bezpeky svitovoho spivtovarystva // Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu. – 2017. – №13. – P. 56–61.

8. Shved M. Tendentsii rozvytku zarubizhnoi ekolohichnoi osvity // Visnyk Lvivskoho un-tu. Serii: pedahohichna. – 2003. – №17. – P. 167–174.

9. Kindratets O.M. Formuvannia suspilstva staloho rozvytku: problemy i perspektyvy. Naukova monohrafiia. Vyd-vo ZDIA, 2003. – 383 p.

10. Pidlisniuk V., Rudyk I., Kyrylenko V., Vyshenska I., Masliukivska O. Stalyi rozvytok suspilstva: rol osvity: putivnyk K.: Vyd-vo SPD «Kovalchuk, 2005. – 22 p.

11. Vysotska O.Ye. Osvita dlia staloho rozvytku: naukovo-metodychnyi posibnyk. – Dnipropetrovsk: Roial Prynt, 2011. – 200 p.

12. Vashchuka F.H. Intehratsiia v yevropeyskyi osvithni prostir: zdobutky, problemy, perspektyvy. – Uzhhorod: ZakDU, 2011. – 560 p.

УДК 378.14

А. Ю. Масікевич, В. В. Лебедєв, К. О. Горбунов, В. Ф. Моїсеєв

**СУЧАСНІ ТА ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ НАВЧАННЯ СТУДЕНТІВ  
МЕДИЧНИХ СПЕЦІАЛЬНОСТЕЙ В ОБЛАСТІ БЕЗПЕКОВИХ ДИСЦИПЛІН ТА  
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

У статті показані дослідження з вивчення сучасних та інноваційних технологій навчання в області екологічної безпеки, енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності. Методологічну основу дослідження статті складають ідеї філософії та психології про професійну діяльність, а також методологічні підходи в освіті в сфері екологічної безпеки та енергозбереження: системний, компетентнісний, діяльнісний, акмеологічний. Дизайн дослідження спирався на теорію моделювання спеціаліста, теоретичні основи формування структури та змісту професійної освіти та загальну концепцію безпекової підготовки студентів-медиків та викладання дисциплін, пов'язаних з тематикою екологічної безпеки та енергозбереження. Методологічна база дослідження базувалася на концепції сталого розвитку та принципах екологічної безпеки та енергозбереження, положення Х. Брундтланда при визначенні завдань концепції сталого розвитку. Незважаючи на те, що багато українських університетів є лідерами у наукових розробках, пов'язаних із підвищенням енергоефективності, в освітній діяльності цей потенціал використовується в основному тільки в процесі підвищення кваліфікації керівників та спеціалістів підприємств. Однак студенти-медики, що навчаються у вищих навчальних закладах, - це одна з самих складних категорій жителів нашої країни, для яких енергозбереження є відірваною від реальності наукою. Розкривати питання про необхідність берегти енергію необхідно разом зі студентами-медиками, поступово підводячи їх до усвідомлення того, що раціонально споживати та берегти – це ознака освіченості та турботи про своє майбутнє, про майбутнє країни. Потреба в екологічній безпеці та енергозбереженні повинна прийти в результаті поступового розуміння необхідності цього процесу та важливості ролі індивіда в цьому процесі, і в жодному випадку не повинна бути нав'язана студенту законами, постановами і тощо. Показано, що при реалізації освіти студентів-медиків необхідно підвищити якість освіти шляхом створення інноваційної системи підготовки на основі акцентованого навчання за темами, які є найбільш актуальними в області екологічної безпеки та енергозбереження для різних напрямків, уникаючи при цьому зайвої інформації, яку студент-медик повинен отримувати самостійно. Для вирішення цього системного завдання необхідно у навчальному процесі реалізовувати сучасні освітні технології. Для ефективного формування компетенцій з напряму навчання було визначено когнітивні цілі управління професійною підготовкою щодо формування основ екологічної безпеки та енергозбереження у студентів-медиків. Для досягнення визначених когнітивних цілей пропонується застосування таких інноваційних технологій навчання: технології постановки ситуаційної та кейс-завдання, технології висування гіпотез та обґрунтування обраного шляху вирі-

шення проблеми з використанням методу мінімаксу, технології проектно-аналітичного аналізу з використанням методу хакатону.

**Ключові слова:** екологічна безпека, енергозбереження, технології навчання, інновації.

A. Y. Masikevych, V. V. Lebedev, K. O. Gorbunov, V. F. Moiseev

**MODERN AND INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR TRAINING MEDICAL STUDENTS IN THE FIELD OF SAFETY DISCIPLINES AND ENERGY CONSERVATION**

The article presents the research on the study of modern and innovative technologies of training in the field of environmental safety, energy saving and increasing energy efficiency. The methodological basis of the research article is the ideas of philosophy and psychology about professional activity, as well as methodological approaches in education in the field of environmental safety and energy saving: systemic, competence, activity, acmeological. The design of the study was based on the theory of specialist modeling, theoretical foundations of the formation of the structure and content of professional education and the general concept of training medical students and teaching disciplines related to the topic of environmental safety and energy saving. The methodological basis of the study was based on the concept of sustainable development and the principles of environmental safety and energy saving, the provisions of H. Brundtland in determining the tasks of the concept of sustainable development. Despite the fact that many Ukrainian universities are leaders in scientific developments related to increasing energy efficiency, in educational activities this potential is used mainly only in the process of improving the skills of managers and specialists of enterprises. However, medical students studying in higher educational institutions are one of the most difficult categories of residents of our country, for whom energy saving is a science divorced from reality. It is necessary to disclose the issue of the need to save energy together with medical students, gradually leading them to the realization that rational consumption and saving is a sign of education and concern for their future, the future of the country. The need for environmental safety and energy saving should come as a result of a gradual understanding of the need for this process and the importance of the individual's role in this process and in no case should it be imposed on the student by laws, regulations, etc. It is shown that when implementing the education of medical students, it is necessary to improve the quality of education by creating an innovative training system based on focused training on topics that are most relevant in the field of environmental safety and energy saving for various areas, while avoiding unnecessary information that a medical student must receive independently. To solve this systemic problem, it is necessary to implement modern educational technologies in the educational process. For the effective formation of competencies in the field of study, cognitive goals of managing professional training for the formation of the basics of environmental safety and energy saving in medical students were defined. To achieve certain cognitive goals, the use of such innovative training technologies is proposed: technology for setting a situational and case task, technology for putting forward hypotheses and justifying the chosen path to solving the problem using the minimax method, technology of project-analytical analysis using the hackathon method.

**Keywords:** environmental safety, energy saving, teaching technology, innovation.

Д. В. Мірошніченко, д. техн. н., проф., В. Б. Байрачний, к. техн. н., проф.,  
О. В. Адашевський, аспірант

## КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ЗАПОБІГАННЯ ПЛІСНЯВІННЯ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБНИЦТВ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАЛОГО ПОВОДЖЕННЯ З НИМИ

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»*

**Ключові слова:** гумінові кислоти, буре вугілля, плісневі гриби, комбікорм, циркулярна економіка.

**Вступ.** Вітчизняний ринок кондитерських виробів представлений кількома потужними виробниками, таким як корпорація «ROSHEN», «Світоч» (входить у групу компаній Nestle) «АВК», «Konti», «Монделіс Україна», «Бісквіт-Шоколад», «Житомирські ласощі», «Полтава-кондитер», а також низькою локальних виробників. Споживання кондитерських виробів населенням має чіткий сезонний та географічний характер. В залежності від економічної ситуації в країні суттєвих коливань зазнає тільки попит на продукцію преміум сегменту та шоколадні цукерки, тоді як не дорогі та середні за ціною борошняні кондитерські вироби, цукрові вироби мають стабільний попит [1].

Комплексний вплив на стан навколишнього природного середовища від діяльності кондитерських виробництв полягає у утворенні великої кількості стічних вод, у яких переважають органічні забруднювачі, викидах в атмосферу парникових газів та органічного пилю та утворенні великої кількості твердих відходів, в тому числі відходів пакування та твердих органічних відходів.

Тверді органічні відходи кондитерських виробництв (далі – ТОВКВ) утворюються на різних стадіях життєвого циклу кондитерської продукції. До таких відходів відносяться:

- 1) залишки виробництв кінцевої продукції, наприклад обрізки кромки твердих борошняних кондитерських виробів;
- 2) готова продукція, яка втратила свій зовнішній вигляд на одній зі стадій виробництва або під час зберігання безпосередньо на виробництві;
- 3) готова продукція, яка втратила свій зовнішній вигляд на етапі транспортування під час зберігання на гуртових складах або в мережах роздрібною торгівлі;
- 4) продукція, термін споживання якої закінчився та вона повинна бути вилучена з торгівельних мереж.

Перша та друга група може бути умовна об'єднана у групу відходи виробництва, а третя та четверта – відходи споживання.

Велика кількість ТОВКВ, які є ресурсоцінними відходами, накопичується у посередників на складах. Однією з поширених проблем при зберіганні такого типу відходів є їх пліснявіння (активний розвиток цвілевих грибів), що пов'язано як з умовами зберігання, так й з властивостями самих відходів, які фактично є поживними середовищем для розвитку різних типів плісняви [2]. Як екосистемний елемент цвілеві гриби виконують функцію деструктора, руйнуючі органічні речовини та сприяючи руйнуванню, в тому числі, органічних відходів [3].

Одним з елементів сталого поводження з відходами – в межах концепції сталого розвитку та циркулярної економіки – є їх рециклінг з метою отримання інших продуктів чи товарів. При використанні ТОВКВ в якості доданки до комбікормів, плісеневі (цвілеві) гриби є небезпечним елементом, який впливає на потенціал такого використання [2].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Розвиток плісневих (цвілевих) грибів у комбікормах призводить до отруєння їхніми токсинами сільськогосподарських тварин, тому є вкрай небажаним явищем, яке може проявитися не тільки на етапі виготовлення комбікормів, а й на етапі зберігання. [4, 5]. Ефективним способом попередження отруєння мікотоксинами є їх нейтралізація та дезактивація за допомогою різноманітних сорбентів, які входять до складу комбікормів. У [4] доведено використання мінеральних сорбентів у складі комбікормів для вигодівлі свиней, у [5] автори зазначають, що ефективним сорбентом мікотоксинів є модифіковані глюкоманнани, які здатні нейтралізувати всі відомі на даний момент мікотоксини у комбікормах. Мікотоксини загрожують не тільки сільськогосподарським тваринам, а є небезпечними для бджіл [6] й загрожують органічному бджолярству.

Загалом плісеневі гриби несуть загрозу як сільськогосподарським тваринам, так й здоров'ю людей, що підтверджується проведеними у роботі [7] дослідженнями, які показали небезпеку для людини плісневих грибів роду *Aspergillus*, *Penicillium*, *Fusarium*, оскільки вони продукують найнебезпечніші мікотоксини, в тому числі афлатоксини В1, В2, G1, G2, М1, М2. Автор також наголошує, що деякі мікотоксини можуть продукуватися різними видами плісневих грибів, одночасно з цим один й той же вид плісневих грибів може продукувати кілька видів мікотоксинів.

Останнім часом для попередження розвитку плісневих грибів у різних матеріалах, в тому числі й тих, які контактують з людиною, використовують гумінові кислоти [8–10].

Метою статті є розробка комплексного підходу, який збільшує термін, впродовж якого не відбувається розвитку плісневих грибів у твердих органічних відходах кондитерських виробництв.

**Матеріали та методика досліджень.** У даному дослідженні використовувались наступні матеріали:

1) відходи борошняних кондитерських виробів, а саме тверді органічні відходи виробництва та споживання вафель без жирової начинки, вафель з жировою начинкою та печива без глазури та без начинки (табл. 1, табл. 2). Матеріали зберігались у місці тимчасового накопичення та зберігання таких відходів у м. Харків. Дослідження проводились безпосередньо у місці зберігання. Печиво цукрове – це переважно печиво відоме під назвою «Ювілейний букет», «Цукрове», «На здоров'я», «До кави», печиво з тяжке відповідно – «Марія», «Галетне», «Тваринний світ» різних виробників.

2) лужний розчин гумінових кислот – 8,5 % у NaOH. Гумінові кислоти отримували екстракційним методом з бурого вугілля згідно методики, описаній у [8, 10] у лабораторних умовах.

Для визначення вологості відходів використовували термогравіметричний метод (ДСТУ 4910:2008) та портативний прилад Venetech GM650В для експрес визначення вмісту вологи у зразках в польових умовах.



Digital Microscope HDcolor CMOS Sensor (China) використовували для мікроскопічного аналізу плісневих грибів, визначення площі ураженої плісневими грибами та глибини проникнення плісневих грибів.

Таблиця 1 – Склад досліджуваних зразків твердих органічних відходів борошняних кондитерських виробів

Зразок	Вміст компонентів, мас. %				Джерело походження
	вафлі		печиво		
	без жирової начинки	з жировою начинкою	затяжне	цукрове	
В1	100	0	0	0	відходи виробництва
В2	0	100	0	0	відходи виробництва
В3	100	0	0	0	відходи споживання
В4	0	100	0	0	відходи споживання
П1	0	0	100	0	відходи виробництва
П2	0	0	0	100	відходи виробництва
П3	0	0	100	0	відходи споживання
П4	0	0	0	100	відходи споживання
ВП1	70	0	30	0	відходи виробництва
ВП2	70	0	0	30	відходи виробництва
ВП3	0	70	30	0	відходи виробництва
ВП4	0	70	0	30	відходи виробництва
ВП5	0	55	15	30	суміш, утворена безпосередньо в місці зберігання

Таблиця 2 – Усереднена харчова цінність відходів у перерахунку на 100 грам

Зразок	Енергетична цінність, кДж	Жири, г	Вуглеводи, г	Білки, г	Інші компоненти, г
В1, В3 <sup>1</sup>	1618	3,9	76,7	11,3	8,1
В2, В4 <sup>1</sup>	2172	27	65	7,5	0,5
П1, П3 <sup>1</sup>	1702	8,5	72,4	9	10,1
П2, П4 <sup>1</sup>	1881	15,4	69,0	7,0	8,6
ВП1 <sup>2</sup>	1643	5,3	74,4	10,2	10,1
ВП2 <sup>2</sup>	1678	7,4	74,4	10,1	8,1
ВП3 <sup>2</sup>	2031	21,5	67,2	7,9	3,4
ВП4 <sup>2</sup>	2085	23,5	66,2	7,3	3,0
ВП5 <sup>2</sup>	1795	17,2	63,8	6,7	12,3

Примітки: 1 – згідно даних виробників; 2 – визначено згідно рекомендацій наведених у [11,12].

**Обговорення результатів.** Проведений аналіз системи зберігання ТОВКВ [13] показав, що у прифронтових областях переважна більшість таких відходів зберігається відкритим способом на складах підприємств – посередників або навіть на промайданчиках виробників. Такий підхід є виправданим з економічної точки зору тільки за умови швидкого використання ТОВКВ у складі комбікормів для тварин. Частка ТОВКВ, які зберігаються більше 60 діб на складах збільшилась до 65% після початку повномасштабного вторгнення проти 35 % до 24.02.2024 (за власними оцінками керівників підприємств посередників), що спричинено масштабними руйнуванням як місць зберігання відходів, так й тваринницьких комплексів, логістичних ланцюгів та необхідністю пошуку нових споживачів.

Комплексний підхід до збільшення терміну, впродовж якого в ТОВКВ не відбувається активного розвитку плісневих грибів, включає в себе два етапи: організаційний та бактерицидний.

Організаційний етап передбачає комплекс заходів, які зменшують контакт ТОВКВ з атмосферними опадами. В даному дослідженні порівнювались наступні умови тимчасового накопичення та зберігання ТОВКВ:

1) відкритим способом штабелями різної висоти на дерев'яних піддонах у різному пакуванні;

2) під навісом, який зменшує контакт з атмосферними опадами. У випадку дощу низької інтенсивності за відсутності шквального вітру захищеними від осадів виявляються 90% верхніх рядів, а за умови інтенсивного дощу (зливи, кількість осадів 56 мм за годину й більше) до 45% бокової поверхні штабелів мають контакт з водою.

Кількість атмосферних опадів та температурні коливання [14] під час експерименту у м. Харків в травні – липні 2024 року наведені у табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристика погодних умов під час експерименту

Період експерименту, день	Кількість атмосферних опадів, мм	Середня температура, °С	
		денна	нічна
1–30	25,9	20,2	12,2
31–60	28,9	24,7	16,2
61–90	18,9	27,4	18,2

Збільшення вологості відходів призводить до стрімкого росту плісневих грибів у всіх зразках твердих органічних відходів кондитерських виробництв (табл. 4, рис. 1). Зауважимо, що період спостережень у 2024 р. був посушливий, особливо у порівнянні з кліматичною нормою, яка становить 50–75 мм осадків у травні, червні та липні. У сумішах, до складу яких входять вафлі з жирною начинкою (В2, В4, ВП3, ВП4, ВП5) найшвидше відбувається розвиток плісневих грибів не тільки тому, що вони мають найбільший початковий та кінцевий вміст вологи, а й завдяки наявності самої жирної начинки, яка є поживним середовищем для розвитку плісневих грибів. При проведенні експерименту у лабораторних умовах при стабільній вологості повітря 75 % плісневі гриби у вафлях з жирною начинкою розвивались на 102 добу, тоді як у вафлях без жирної начинки – на 154 добу.

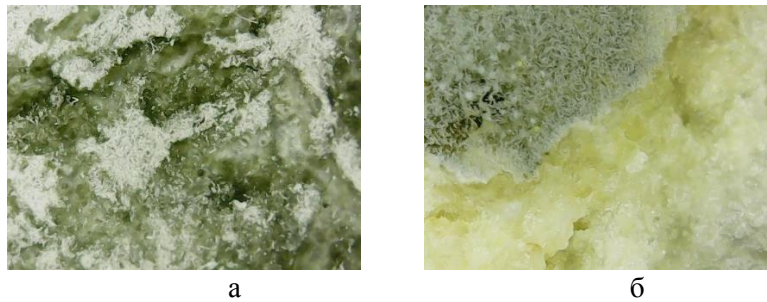
Прості організаційні заходи, такі як навіс, збільшують термін зберігання ТОВКВ без прояву плісневих грибів в середньому на 20 діб, в залежності від типу пакування та типу відходів. Для відходів споживання, які потрапляють в індивідуальному порційному полімерному пакуванні та зберігаються у картонних ящиках (В3, В4, П3, П4), в цілому спостерігається більший термін зберігання до появи плісневих грибів та не таке суттєве збільшення вологості відходів, як у випадку зберігання відходів у біг бегах, конструкція яких є не щільною, що призводить до полегшення потрапляння води до відходів. До відходів споживання вода потрапляє тільки внаслідок порушення цілісності індивідуального пакування, що неодмінно відбувається при їх зберіганні у торговельних мережах та перевезенні.

Таблиця 4 – Час появи плісневих грибів в залежності від вологості твердих органічних відходів кондитерських виробництв

Зразок	Вологість зразків <sup>1</sup> , %			Тип пакування	Час до появи плісневих грибів на поверхні, метод мікроскопії, діб	
	нормативна згідно ДСТУ	на початку експерименту	у момент виявлення плісневих грибів			
В1	<4,5 [11]	25	55 <sup>2</sup>	Біг бег, 25 кг	39 <sup>2</sup>	
			32 <sup>3</sup>		62 <sup>3</sup>	
В2	<32 [11]	41	66		25	
			49		53	
В3	<4,5 [11]	15	35		Порційне полімерне пакування, складене у картонні коробки	60
			20			75
В4	<32 [11]	22	47	35		
			34	61		
П1	2–9 [12]	18	42	Біг бег, 25 кг	50	
			24		68	
П2	5–9 [12]	19	44		51	
			26		66	
П3	2–9 [12]	12	35	Порційне полімерне пакування, складене у картонні коробки	68	
			19		82	
П4	5–9 [12]	14	37		65	
			20		78	
ВП1	не нормується	23	53	Біг бег, 25 кг	40	
			30		64	
ВП2		24	54		41	
			32		66	
ВП3		33	63		27	
			44		57	
ВП4		34	65		26	
			45		59	
ВП5		37	58		34	
			36		70	

Примітки: 1 – визначена згідно [15]; 2 – перше значення для зразків, що зберігались без організаційних заходів; 3 – друге значення для зразків, що зберігались під навісом.

У зразках відходів В1-В4 за методикою, описаною у [16], було визначено, що основний вид плісневих грибів – *Aspergillus niger* й загальна контамінація становить  $26,50 \times 10^4$  спор у 1 грамі. Такий вміст у 5 разів більше, ніж допустима норма для готових комбікормів [16]. Таким чином не можливо використовувати дані відходи для виготовлення комбікормів без додаткових енергетичних витрат на їх двократне знезараження шляхом просушування за температури 180–200 °С для нейтралізації плісневих грибів [17].



а – на поверхні зразка В3; б – на поверхні зразка П1  
Рисунок 1 – Мікроскопічне виявлення плісневих грибів

Другий етап комплексного підходу до запобігання пліснявінню ТОВКВ полягає в обробці поверхні відходів лужним розчином гумінових кислот у розрахунку 5 мас.%. Отримані дані (рис. 2) свідчать про здатність гумінових кислот суттєво уповільнювати розвиток плісневих грибів та збільшувати термін зберігання ТОВКВ навіть відкритим способом.

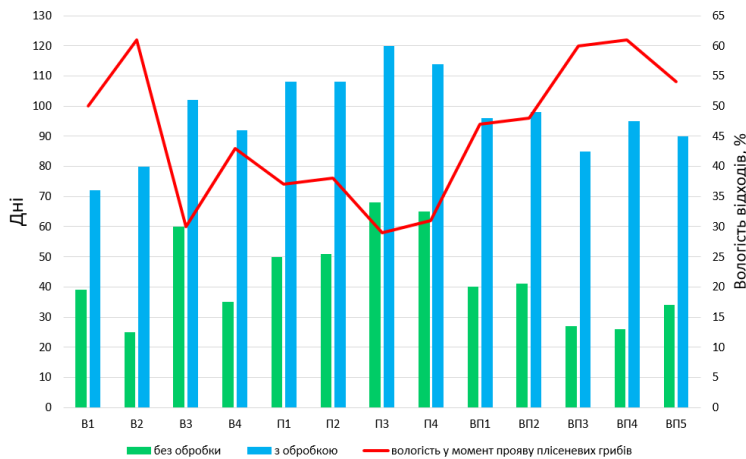


Рисунок 2 – Вплив обробки ТОВКВ лужним розчином гумінових кислот на термін до появи плісневих грибів

При цьому спостерігається незначне зменшення вологості зразків у момент виявлення плісневих грибів при обробці їх гуміновими кислотами. Наприклад, для відходів, які містять вафлі з жировою начинкою (В2, В4, ВП3, ВП4, ВП5) термін до прояву плісневих грибів збільшується в середньому на 50 днів. При цьому гумінові кислоти не несуть потенційного ризику тваринам при виготовленні корму з додаванням ТОВКВ, оброблених ними, оскільки по-перше, їх додається всього 5 мас.%, а по друге гумінові кислоти є складовою багатьох кормових доданок для худоби, наприклад ТМ «Greennat», «Reasil» та позитивно впливають на стан здоров'я худоби [18].

**Висновки.** При реалізації сталого підходу до поводження з твердими органічними відходами кондитерських виробництв одним з пріоритетних напрямків є їх використання в якості доданки до комбікормів для різних свійських тварин. Такий підхід також є елементом циркулярної економіки. Використання ТОВКВ у складі комбікормів часто обмежується швидким проявом плісневих грибів на органічних відходах внаслідок підвищення їх вологості та наявності поживного середовища. Уражені плісневими грибами ТОВКВ економічно не доцільно використовувати, адже для знезараження необхідно витратити додаткові ресурси на просушування. Враховуючи поточну ситуацію з руйнуванням приміщень складів, одним з методів збільшити терміну до прояву плісневих грибів у ТОВКВ є їх зберігання під найпростішими навісами для зменшення контакту з атмосферними осадами, адже розвиток плісневих грибів пришвидшується зі збільшенням вологості органічних відходів. Другим апробованим дієвим методом є обробка відходів лужним розчином гумінових кислот, сировинною базою для отримання яких є буре вугілля. Поклади бурого вугілля є значними на території України, проте його використання в якості палива є низькоефективним.

Подальшого дослідження потребує пошук оптимальної масової частки нанесення гумінових кислот для отримання найбільшого терміну безплісеневого зберігання ТОВКВ, беручи до уваги склад ТОВКВ та економічний фактор, тобто витрат на збільшення кількості гумінових кислот.

#### Література

1. Сорокіна А.М. Аналіз сучасного стану підприємств кондитерської галузі України та шляхи підвищення економічної ефективності виробництва з запровадженням інновацій. Вісник ХНТУ. 2023. № 4(87). С. 429–436.
2. Адашевський О.В. Використання твердих відходів кондитерських фабрик при виробництві комбікормів як елемент сталого розвитку України. Екологічні науки: науково-практичний журнал. 2023. № 1(46). С. 179–183.
3. Малишок І.О., Фролова Ю.М. Цвілеві гриби як показник натуральності продуктів харчування. Освіта, наука та виробництво: розвиток та перспективи: матеріали III Всеукр. наук.-метод. конф., 19 квітня 2018 р. Суми: Сумський державний університет, 2018. С. 93–94.
4. Бегма Н. А. Попередження мікотоксикозів і зниження втрат в умовах виробництва ефективним адсорбентом. Проблеми годівлі тварин в умовах високоінтенсивних технологій виробництва і переробки продукції тваринництва: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., присвяч. 80-річчю від дня народж. видатного вченого, д-ра с.-г. наук, проф. Л. С. Д'яченка, 1–2 лют. 2019 р. Біла Церква: Білоцерківський НАУ, 2019. С. 3–7. URL: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/1736>.
5. Лихач В.Я., Лихач А. В., Фаустов Р.В., Задорожній В. В., Комплексний препарат «Гепасорбекстм» у промисловому свинарстві Тваринництво України. 2019. №2. С. 32–36.
6. Ткачук В.І., Андрійчук В.Ф., П'яківський В.М. Мікотоксини – як загроза органічному бджільництву. Органічне виробництво і продовольча безпека : зб. матеріалів доп. учасн. IV Міжнар. наук.-практ. конф., 12–13 травня 2016р. Житомир: О.О. Євенок, 2016. С. 162–170.
7. Решетило Л.І. Мікробіологічна безпека харчових продуктів: плісневі гриби та ризики отруєння їх токсинами. Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки. 2020. №24. С. 58–65.

8. Лебедев В.В., Мірошніченко Д.В., Савченко Д.О., Тихомирова Т.С. Розробка та дослідження гібридних екологічно чистих біодеградабельних плівок з бактерицидними властивостями. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Т. 33 (72). № 3. С. 87–91. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/14>.

9. Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Mysiak V.R. [et al.] Hybrid eco-friendly biodegradable construction composites modified with humic substances. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture = Вісник Одеської державної академії будівництва і архітектури. 2022. № 87. Р. 92–99.

10. Лебедев В.В., Мірошніченко Д.В., Савченко Д.О., Тихомирова Т.С., Забіяка Н.А. Дослідження біодеградабельних плівок на основі етерів целюлози з бактерицидними властивостями. Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. № 2. С. 55–64. URL: <http://doi.org/10.20998/2078-5364.2022.2.05>.

11. ДСТУ 4033:2018. Вафлі. Загальні технічні умови. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2018. 7с. (Державний стандарт України).

12. ДСТУ 3781:2014. Печиво. Загальні технічні умови. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 20 с. (Державний стандарт України).

13. Байрачний В.Б., Адашевський О.В. Дослідження впливу місць зберігання твердих кондитерських відходів на прилеглі екосистеми. Таврійський науковий вісник. Серія: Сільськогосподарські науки. 2024. Вип. 136. Ч. 1. С. 266–273.

14. Архів погоди. Електронний ресурс. URL: <https://meteopost.com/weather/archive/> (дата звернення 22.11.2025).

15. ДСТУ 4910:2008. Вироби кондитерські. Методи визначення масових часток вологи та сухих речовин. Технічні умови. Київ: Держспоживстандарт України, 2008. 22 с. (Державний стандарт України).

16. Ображей А.Ф., Погребняк Л.І., Корзуненко О.Ф., Васянович О.М. та ін. Методичні вказівки по санітарно-мікологічній оцінці та поліпшенню якості кормів. Затверджені Державним департаментом ветеринарної медицини Міністерства АПК України № 15-14-73 від 06.03.1998 р. Київ, 1998. 107 с.

17. Про затвердження Переліку речовин, наявність яких у кормах є обмеженою або забороненою: Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України № 2691 від 16.08.2024 / Верховна рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1326-24#n7> (дата звернення: 19.11.2024).

18. Рильський О.Ф., Петруша Ю.Ю., Домбровський К.О., Охріменко С.Г. Вплив гумінових та фульвових кислот на живі організми та перспективи їх застосування в сільському господарстві, медицині та ветеринарії. Агроекологічний журнал. 2023. №3. С. 143–153.

#### Bibliography (transliterated)

1. Sorokina A.M. (2023). Analiz suchasnoho stanu pidpriemstv kondyterskoi haluzi Ukrainy ta shliakhy pidvyshchennia ekonomichnoi efektyvnosti vyrobnytstva z zaprovadzhenniam innovatsii . Visnyk KhNTU, № 4(87), P. 429–436.

2. Adashevskiy O.V. (2023). Vykorystannia tverdykh vidkhodiv kondyterskykh fabryk pry vyrobnytstvi kombikormiv yak element staloho rozvytku Ukrainy. Ekolohichni nauky: naukovo-praktychnyi zhurnal, № 1(46), P.179–183.

3. Malyshok I.O., Frolova Yu.M. (2018) Tsvilevi hryby yak pokaznyk naturalnosti produktiv kharchuvannia. Osvita, nauka ta vyrobnytstvo: rozvytok ta perspektyvy: materialy

III Vseukr. nauk.-metod. konf. 19 kvitnia 2018r. Sumy: Sumskyi derzhavnyi universytet, P.93–94.

4. Behma N. A. (2019) Poperedzhennia mikotoksykoziv i znyzhennia vtrat v umovakh vyrobnytstva efektyvnym adsorbentom. Problemy hodivli tvaryn v umovakh vysokointensyvnykh tekhnolohii vyrobnytstva i pererobky produktsii tvarynnytstva: materyaly Mizhnar. nauk.-prakt. konf., prysviach. 80-richchiu vid dnia narodzh. vydatnoho vchenoho, d-ra s.-h. nauk, prof. L. S. Diachenka 1-2 liut. 2019 r. Bila Tserkva: Bilotserkivskiyi NAU, P. 3–7. URL: <http://dspace.dsau.dp.ua/jspui/handle/123456789/1736>.

5. Lykhach V.Ia., Lykhach A. V., Faustov R.V., Zadorozhnyi V. V. (2019) Kompleksnyi preparat «Hepasorbekstm» u promyslovomu svynarstvi. Tvarynnytstvo Ukrainy, №2, P. 32–36.

6. Tkachuk V.I., Andriichuk V.F., Piaskivskiyi V.M. (2016) Mikotoksyny – yak zahroza orhanichnomu bdzhilnytstvu. Orhanichne vyrobnytstvo i prodovolcha bezpeka : zb. materialiv dop. uchasn. IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf. 12-13 travnia 2016r. Zhytomyr: O.O. Yevenok, P. 162–170.

7. Reshetylo L.I. (2020) Mikrobiolohichna bezpeka kharchovykh produktiv: plisenevi hryby ta ryzyky otruiennia yikh toksynamy. Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky, №24, P. 58–65.

8. Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Savchenko D.O., Tykhomyrova T.S. (2022) Rozrobka ta doslidzhennia hibrydnykh ekolohichno chystykh biodehradabelnykh plivok z bakterytsydnymy vlastyvostiamy Vcheni zapysky Tavriiskoho natsionalnoho universytetu imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky, Vol. 33 (72), № 3, P. 87–91. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.3/14>.

9. Lebedev V.V., Miroshnichenko D.V., Mysiak V. R. [et al.] (2022) Hybrid eco-friendly biodegradable construction composites modified with humic substances. Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, № 87, P. 92–99.

10. Lebedev V.V., Miroshnychenko D.V., Savchenko D.O., Tykhomyrova T.S., Zabiia N.A. (2022) Doslidzhennia biodehradabelnykh plivok na osnovi eteriv tseliulozy z bakterytsydnymy vlastyvostiamy. Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia, № 2, P. 55–64. URL: <http://doi.org/10.20998/2078-5364.2022.2.05>.

11. DSTU 4033:2018. Vafli. Zahalni tekhnichni umovy. Kyiv: DP «UkrNDNTs», 2018. 7 p.

12. DSTU 3781:2014. Pechyvo. Zahalni tekhnichni umovy. Kyiv: Minekonomrozvytku Ukrainy, 2015. 20 p.

13. Bairachnyi V.B., Adashevskiyi O.V. (2024) Doslidzhennia vplyvu mistv zberihannia tverdykh kondyterskykh vidkhodiv na pryehli ekosystemy Tavriiskiyi naukovyi visnyk. Serii: Silskohospodarski nauky, Vyp. 136, Ch. 1, P. 266–273.

14. Arkhiv pohody. Elektronnyi resurs. URL: [https://meteopost.com/weather/archive/\(data zvernennia 22.11.2025\)](https://meteopost.com/weather/archive/(data%20zvernennia%2022.11.2025)).

15. DSTU 4910:2008. Vyrobny kondyterski. Metody vyznachennia masovykh chastok volohy ta sukhykh rehovyn. Tekhnichni umovy. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukrainy, 2008. 22 p.

16. Obrazhei A.F., Pohrebniak L.I., Korzunenکو O.F., Vasianovych O.M. (1998) ta in. Metodychni vkazivky po sanitarno-mikolohichnii otsintsi ta polipshenniu yakosti kormiv. Zatverdzeni Derzhavnym departamentom veterynarnoi medytsyny Ministerstva APK Ukrainy № 15-14-73 vid 06.03.1998 r. Kyiv, 107 p.

17. Pro zatverdzhennia Pereliku rehovyn, naiavnist yakykh u kormakh ye obmezhenoiu abo zaboronenoii: Nakaz Ministerstva ahrarnoi polityky ta prodovolstva

Ukrainy № 2691 vid 16.08.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1326-24#n7> (data zvernennia: 19.11.2024).

18. Ryl'skyi O.F., Petrusha Yu.Iu., Dombrovskyi K.O., Okhrimenko S.H. (2023) Vplyv huminovykh ta fulvovykh kyslot na zhyvi orhanizmy ta perspektyvy yikh zastosuvannia v sil'skomu hospodarstvi, medytsyni ta veterynarii. Ahroekolohichniy zhurnal, №3, P. 143–153.

УДК 352/353

Д. В. Мірошніченко, В. Б. Байрачний, О. В. Адашевський

### **КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ЗАПОБІГАННЯ ПЛІСНЯВІННЯ ТВЕРДИХ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ КОНДИТЕРСЬКИХ ВИРОБНИЦТВ ЯК ЕЛЕМЕНТ СТАЛОГО ПОВОДЖЕННЯ З НИМИ**

Стале поводження з відходами різного типу передбачає як їх мінімізацію їх кількості шляхом удосконалення технологічних процесів, так й використання відходів в якості ресурсів. Велика кількість твердих органічних відходів кондитерських виробництв містять харчові елементи, які можуть бути використані в якості доданок при виготовленні комбікормів. Таким чином досягається здешевлення готових комбікормів без втрати їх якості, а також відбувається вторинне використання твердих органічних відходів кондитерських виробництв, що відповідає загальноприйнятій ієрархії управління відходами. Головним обмежуючим фактором використання такого типу відходів у складі комбікормів є швидкий розвиток плісневих грибів, який зумовлений, в тому числі, збільшенням вологості відходів при їх зберіганні відкритим способом на промислових майданчиках.

Метою роботи було дослідити ефективність розробленого комплексного підходу для збільшення терміну зберігання без прояву плісневих грибів для твердих органічних відходів кондитерських виробництв .

У роботі використані наступні методи дослідження: натурні – для спостереження за розвитком плісневих грибів в реальних умовах зберігання твердих органічних відходів кондитерських виробництв відкритим способом; лабораторні для визначення вологості відходів у різні моменти часу згідно ДСТУ 4910:2008 та санітарно-мікологічні оцінки відходів.

Використання найпростіших засобів зменшення контакту атмосферних осадів з твердими органічними відходами кондитерських виробництв – навісів – дозволяє збільшити термін до прояву плісневих грибів на 20 й більше діб, в залежності від складу відходів. Швидший розвиток плісневих грибів характерен для відходів, які містять більше 50 % вафель з жировою начинкою. Обробка твердих органічних відходів кондитерських виробництв лужним розчином гумінових кислот, отриманих з бурого вугілля, збільшує термін до прояву плісневих грибів в середньому на 50 діб. Поєднання двох способів є ефективним для збільшення терміну зберігання твердих органічних відходів кондитерських виробництв перед їх використанням у складі комбікормів. Таким чином можливе збільшення частки використання таких відходів у складі комбікормів.

Запропонований комплексний підхід для збільшення терміну зберігання твердих органічних відходів кондитерських виробництв дозволяє збільшити частку відходів, які придатні для вторинного використання у складі комбікормів. Застосування лужних розчинів гумінових кислот в якості бактерицидного заходу для твердих органічних відхо-



дів кондитерських виробництв є виправданим з точки зору сталого підходу до використання бурого вугілля, дозволяє підвищити харчову цінність кінцевих комбікормів та зменшує енерговитрати на усунення плісневих грибів.

**Ключові слова:** гумінові кислоти, буре вугілля, плісневі гриби, комбікорм, циркулярна економіка.

D. V. Miroshnychenko, V. B. Bayrachny, O. V. Adashevsky

**A COMPREHENSIVE APPROACH TO PREVENTING MOLD GROWTH  
OF SOLID ORGANIC WASTE FROM CONFECTIONERY PRODUCTION AS  
THEIR SUSTAINABLE MANAGEMENT ELEMENT**

Waste sustainable management involves both minimizing their quantity by improving technological processes and using waste as resources. A large amount of solid organic waste from confectionery industries contains food elements that can be used as additives in compound feeds production. This reduces compound feeds cost without losing their quality, and also provides for the secondary use of solid organic waste from confectionery industries, which corresponds to the generally accepted waste management hierarchy. The main limiting factor for this waste type using in compound feeds is mold fungi rapid development, which is due, among other things, to an increase in the waste humidity when stored in an open manner at industrial sites.

The aim of the work was to research developed integrated approach effectiveness to increase the shelf life without the mold fungi appearance for solid organic waste from confectionery industries.

The following research methods were used in the work: field – to observe the mold fungi development in real storage conditions of solid organic waste from confectionery industries in an open way; laboratory – to determine the moisture content of waste at different times according to DSTU 4910:2008 and sanitary and mycological waste assessment.

The use of the simplest measures to reduce the atmospheric contact precipitation with solid organic waste from confectionery industries – canopies – allows us to increase the period until the mold fungi appearance by 20 or more days, depending on the waste composition. Faster mold fungi development is characteristic of waste that contains more than 50 % wafers with fat filling. Solid organic waste from confectionery industries treatment with humic acids alkaline solution obtained from brown coal increases the period until the mold fungi appearance by an average of 50 days. The two methods combination is effective for increasing the shelf life of solid organic waste from confectionery industries before their use in compound feeds. Thus, it is possible to increase the share such waste use in compound feeds.

The proposed integrated approach to increasing the shelf life of solid organic waste from confectionery industries allows to increase the waste share that is suitable for secondary use in compound feeds. The humic acids alkaline solutions using as a bactericidal measure for solid organic waste from confectionery industries is justified from the sustainable approach for brown coal using, allows to increase the nutritional value of the final compound feeds and reduces energy costs for mold fungi elimination.

**Keywords:** humic acids, brown coal, mold fungi, compound feed, circular economy.

## «ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ»

### Щоквартальний науково-практичний журнал

Редколегією до опублікування приймаються статті, написані **державною мовою**, за наступними науковими напрямками:

✓ *енергетика та енергозбереження; енерготехнологія енергоємних галузей промисловості; нетрадиційна енергетика; ресурсозбереження; енергетика та навколишнє середовище;*

✓ *тепловикористовуючі установки; моделювання процесів промислового обладнання; процеси та апарати різних галузей промисловості (хімічної, харчової, медичної та ін.);*

✓ *застосування ЕОМ в технологічних процесах; автоматизовані системи управління та обробки інформації;*

✓ *тепло- і масообмінні процеси та обладнання спеціальної техніки; теплові процеси та кріогенне устаткування медичного призначення;*

✓ *електроенергетика; обладнання електростанцій і передача електроенергії;*

✓ *економічні аспекти енергетики й промислової екології; комерційний інжиніринг, реінжиніринг та технологічний менеджмент, а також інших напрямкам на межі різних галузей знань.*

**Матеріали до опублікування в кожний наступний номер приймаються до 20 числа останнього місяця попереднього кварталу. Рукописи авторам не повертаються.**

Електронна версія статті повинна бути підготовлена у редакторі текстів MS Word for Windows. Сама стаття повинна бути роздрукована у 2-х примірниках. До матеріалів повинні додаватися експертний висновок про можливість опублікування матеріалів у відкритій пресі та рецензія доктора наук за профілем статті.

### **ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТТІ:**

Розмір сторінки А4 (210x297 мм); ліве і праве поля – 25 мм, верхнє і нижнє – 30 мм; рекомендований шрифт Times New Roman Суг; розмір шрифту – 12; міжрядковий інтервал – 1.

### **ПОРЯДОК РОЗМІЩЕННЯ МАТЕРІАЛУ:**

- безпосередньо під верхньою межею зліва **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** друкується УДК статті;
- пропустивши один рядок, по центру друкуються ініціали та прізвища авторів, їх науковий ступінь та звання;
- пропустивши один рядок, по центру напівжирним шрифтом **ВЕЛИКИМИ ЛІТЕРАМИ** друкується назва статті;
- нижче, пропустивши одну строку, друкується назва організації, де працю-

ють автори статті;

- після – розміщуються ключові слова;
- пропускається один рядок і з абзацу (1,25 см) друкується основний текст, відформатований по ширині сторінки;
- перед і після формул і рівнянь має бути відстань в один порожній рядок до тексту з інтервалом 1;
- формули і рівняння мають бути вирівняні по центру;
- номери формул і рівнянь повинні бути вирівняні по правому краю;
- розмір шрифту формул і рівнянь для основного тексту – 12 пт.;
- рисунки, схеми і графіки мають бути виконані в чорно-білому зображенні;
- пропустивши один рядок, подається список літератури, оформлений відповідно до вимог ДСТУ. Згідно вимогам МОН України кількість літературних джерел повинна бути не менш за 12.
- далі розміщується транслітерація списку літератури;
- у кінці статті двома мовами (українська та англійська) мають бути надруковані УДК, автори, назва і анотація. Мінімальна кількість символів кожної анотації – 1800 знаків.

Окремо в редколегію подаються відомості про авторів з їх адресами Email.

**СТАТТІ, ОФОРМЛЕНІ НЕ ВІДПОВІДНО ДО ВИМОГ,  
РЕДКОЛЕГІЯ НЕ РОЗГЛЯДАЄ ТА НЕ РОЗМІЩУЄ У ЖУРНАЛІ**

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ**

Україна, 61002,  
Харків-2, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХПІ»,  
редколегія журналу «Інтегровані технології та енергозбереження»,  
технічний редактор: к. техн. н., професор Горбунов К.О.

*Тел.* (057) 707-69-58.

*Факс* (057) 720-22-95.

Email: [gor.kona2016@gmail.com](mailto:gor.kona2016@gmail.com)

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

**ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

**4'2024**

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 16.12.2024 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.  
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 9,0. 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.