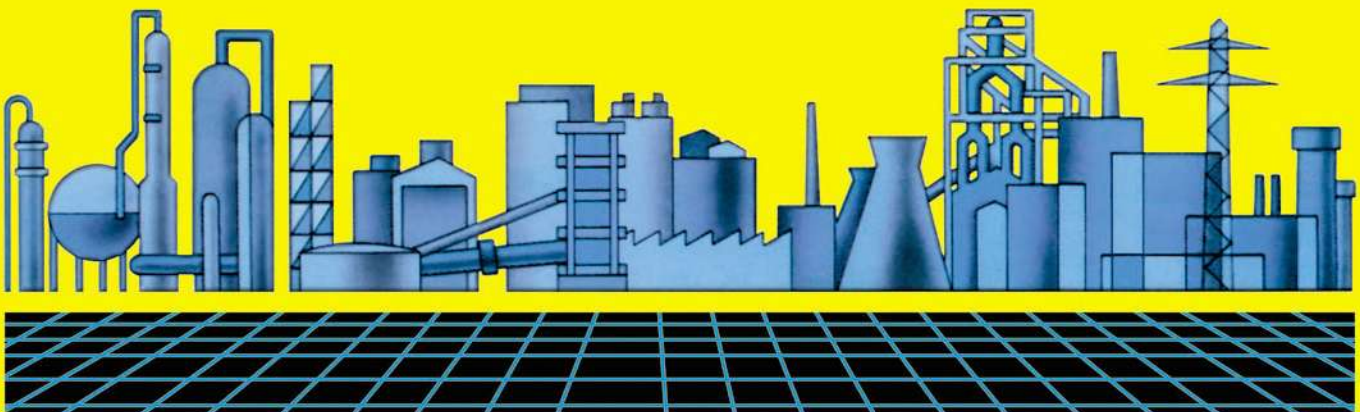


ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

1'2024

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., професор НТУ "ХПИ"

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

О. П. Арсеньова, д-р техн. наук, професор, професор каф. АКІТ ХНУМГ

В. Є. Ведь, д-р техн. наук, професор, зав.каф. ІППА НТУ "ХПИ"

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

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

Г. Л. Хавін, д-р техн. наук, професор, професор НТУ "ХПИ"

А. М. Ганжа, д-р техн. наук, професор, професор каф. ТЕТ НТУ "ХПИ"

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 Католицький університет, Будапешт, 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, Німеччина

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. Tovazhnyansky, 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 Sabevarbanov, Senior Researcher, NETME Centre - SPIL, BRNO University of Technology, Czech Republic

Michael Walmsley, BE, PhD ChemEng, University of Waikato, New Zealand

Petr Stehlik, PhD., professor, Director of Institute BRNO University of Technology, Czech Republic

Panos Seferlis, PhD., professor, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2

Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Селіхов Ю. А., Горбунов К. О., Стасов В. А.

Інтеграція роботи гібридної енергетичної установки..... 3

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Кошельник О. В., Жуков О. В.

Перспективні типи теплоакумуючих елементів регенеративних повітрянагрівачів доменних печей..... 16

*Ведь В. Є., Краснокутський Є. В., Горбунов К. О., Миронов А. М.,
Ільченко М. В., Селіхов Ю. А.*

Стендові дослідження блоку каталітичного перетворювача із шаром каталізатора на поверхні склокристалічних медіаторів..... 24

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Анінко О. Б., Баулін Д. С.

Доцільні терміни регенерації нітроцелюлозних порохових зарядів тривалих термінів зберігання та тривалість післярегенераційного періоду їх життєвого циклу..... 41

*Лебедєв В. В., Мірошніченко Д. В., Богоявленська О. В., Литвиненко Є. І.,
Соловей Л. В.*

Дослідження непаливного застосування похідних бурого вугілля при одержанні мембран на основі гібридних біодеградабельних матеріалів..... 51

Фик І. М.

Перспективи розробки Шебелинського газоконденсатного родовища..... 59

Щербина А. В.

Дослідження ефективності застосування комплексних геолого-технологічних заходів на прикладі газоконденсатного родовища центральної частини приосьової зони Дніпровсько-Донецької западини..... 73

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Дешко В. І., Білоус І. Ю., Голубенко О. О., Сердечний П. Ю., Яркова Н. А.

Оцінювання енергоефективності школи з врахуванням локальних відновлювальних джерел енергії..... 83

Шевченко К. В., Григоров А. Б.

Вторинні полімери як перспективна сировина для виробництва високооктанового автомобільного бензину..... 99

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 2 від 23.02.2024 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження : Щоквартальний науково-практичний журнал. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 1. – 108 с.

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

© Національний технічний університет «ХПІ», 2024

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, К. О. Горбунов, к.техн.н., професор,
В. А. Стасов, магістр

ІНТЕГРАЦІЯ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків

Ключові слова: гібридна енергетична установка, приватне домоволодіння, електроенергія, гаряче водопостачання, опалення, гаряче повітря, електричний водонагрівач, вітроелектрогенератор, органічне паливо, теплова енергія, теплове навантаження, державна електромережа, навколишнє середовище, система автоматизації.

Постановка задачі. Криза 70-х років змусила розвинуті держави підрахувати запаси традиційних джерел енергії та виявилось, що ці запаси не безмежні. Це призвело до необхідності шукати нові, і переважно відновлювані джерела енергії [1].

Найбільш корисним виявилось поєднання кількох видів енергії, одержуваної при згорянні кам'яного вугілля, сонячної, теплової та фотоелектричної енергії, енергії вітру, атомного ядра, океану, енергії, що видобувається з біомаси, та деяких інших джерел. За існуючого рівня науково-технічного прогресу енергоспоживання може бути покрито лише за рахунок використання органічних палив (вугілля, нафти, газу), гідроенергії та атомної енергії. Однак, за результатами численних досліджень, органічне паливо в недалекому майбутньому може задовольнити запити світової енергетики лише частково. Залишок енергоспоживання може бути задоволений за рахунок інших джерел енергії – не-традиційних та відновлюваних [2].

В Україні ринок "теплоенергетичних установок" сьогодні перебуває на початковій стадії розвитку. Зважаючи на те, що сонячна енергетика особливо приваблива для Півдня України і відповідає його інтересам, в аспекті енергонезалежності, де можна було б на реальних об'єктах у повному масштабі і наочно демонструвати можливості відновлюваної сонячної енергетики, спираючись на світовий досвід. Для численних новобудов добре спроектовані і правильно встановлені установки могли б підвищити їх імідж і вартість. Електропостачання за рахунок впровадження вітроустановок, автономне постачання гарячої води за рахунок електричних водонагрівників для побутових цілей або опалення за допомогою теплових насосів - природний і простий метод заощадження енергії та збереження запасів викопного палива. Адже практично сонячну енергію в цьому регіоні ефективно можна використовувати протягом 8 місяців.

Виходячи з історичних коефіцієнтів еластичності зростання енергоспоживання за зростанням ВВП за трьома категоріями споживачів (промисловість, сектор послуг і населення), прогноз споживання електроенергії у 2030 р. у базовому сценарії складе 331 ТВт•год. Але з урахуванням впровадження ініціатив щодо енергозбереження прогноз споживання електроенергії у 2030 р. у базовому сценарії знижується до 282 ТВт•год (включаючи експорт, втрати і власне споживання електростанцій) при середньому щорічному зростанні на рівні 2,0 %. Таке співвідношення зростання ВВП і динаміки споживання електроенергії відповідає показникам, характерним для ринків, які проходять етап інтенсивного розвитку. Сьогодні електроємність ВВП України в декілька разів перевищує аналогічний показник європейських країн. Однією з причин цього є структура укра-

їнської економіки, яка здебільшого складається з електроємних галузей, а також надмірно високі витрати електроенергії на виробництво одиниці продукції. Висока електроємність також викликана істотним технологічним відставанням багатьох галузей промисловості та житлово-комунального господарства та високим зношенням основних фондів.

Держава має стимулювати розвиток відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) для зниження використання викопних паливних ресурсів і негативного впливу на навколишнє середовище. Разом із тим, розвиток ВДЕ в довгостроковій перспективі має відбуватися на основі економічної конкуренції із традиційними джерелами енергії без державного дотування сектору ВДЕ або суміжних галузей. Зниження коефіцієнтів «зеленого тарифу» зумовлене зниженням собівартості будівництва об'єктів, призначених для генерації з ВДЕ, і відповідно, дозволить зберегти природний темп розвитку ВДЕ.

Держава має забезпечувати відповідність темпу зростання потужності ВДЕ темпам розвитку маневрових потужностей і технологічних характеристик енергосистеми України для збереження її надійної роботи. Для цього потрібно розробити і впровадити механізм участі власників електростанцій з ВДЕ у фінансуванні будівництва маневрових потужностей, магістральних і розподільних мереж, необхідних для функціонування цих електростанцій [3].

Однією з причин обмеженого використання відновлюваних джерел енергії є дискретність енергетичних потоків – періодичність нахвощення та змінність енергетичного потенціалу, що до останнього часу спричиняло значні ускладнення в багатьох випадках їх використання і не відповідало сучасним вимогам щодо енергопостачання споживачів. Крім того, в процесі широкомасштабного впровадження обладнання відновлюваної енергетики постає проблема створення регулюючих потужностей на основі традиційних енергосистем для забезпечення стабільного енергопостачання в періоди відсутності енергії ВДЕ. Безумовно, в деяких випадках така необхідність є цілком виправданою, однак у даний час в рамках відновлюваної енергетики існує цілий ряд технічних засобів та методів вирішення проблеми, в тому числі за рахунок використання електричної та теплової енергії.

Високі техніко-економічні показники застосування ВДЕ, стабільні робочі параметри енергетичного обладнання і надійне енергоживлення споживачів досягаються при комбінованому виробленні електричної і теплової енергії, комплексному її акумулюванні в поєднанні з технологіями традиційної енергетики. Для зниження флуктуації параметрів енергосистеми і підтримки необхідних робочих параметрів комбінованого енерговузла необхідно передбачити допоміжне обладнання, у тому числі для автоматичного управління режимами роботи [4–7].

Таким чином, впровадження відновлюваних джерел енергії замість традиційних джерел енергії є актуальною задачею, яка дозволить зробити найбільш чистим навколишнє середовище.

Мета статті. Зробивши аналіз роботи окремих відновлюваних джерел енергії нами був зроблений висновок, що треба розробити таку гібридну енергетичну установку, в якій буде використовуватись енергія вітроелектрогенератора для постачання електроенергії, електричного водонагрівника для постачання гарячої води та геотермального ґрунтового теплового насосу «ґрунт-вода» для опалення приватного домоволодіння з цілодобовим комп'ютерним керуванням. Для цього був обраний в якості прототипу двоконтурний котел з газовим пальником, який забезпечував приватне домо-

господарство гарячою водою та опаленням. Електрикою приватне домогосподарство забезпечувалось з державної магістральної електромережі. Зробивши аналіз роботи двоконтурного котла та електрики були визначені недоліки цієї системи. 1. З огляду на пристрій двоконтурного котла варто розуміти, що будинки з подачею гарячої води від бойлера або від міської системи водопостачання можуть обійтися і одноконтурним приладом, який обійдеться дешевше. 2. Мінусом даних приладів є те, що контури неспроможні працювати окремо друг від друга. І якщо раптом ви захочете підігріти воду влітку, не опалюючи житло, зробити це у вас не вийде. 3. Тепер опалювальне обладнання оснащують пальниками закритого типу. Подібні котли називають «турбованими». Для їх експлуатації потрібно монтаж компактних димоходів, які нерідко виводять прямо за стінку, коли будинок тільки будується. Через димохід видаляються продукти, що утворилися в процесі горіння палива, які забруднюють навколишнє середовище. 4. Тарифи на газ для населення з кожним роком зростають. 5. Складний пристрій закритого газового пальника для побутового котла має складну конструкцію, що ускладнює ремонтні роботи. 6. Чим більше деталей, тим частіше ламається обладнання. 7. «Турбований» агрегат коштує на 10–15 % дорожче порівняно з атмосферними аналогами. 8. Підвищений рівень шуму, який залежить від обраної модифікації. Вбудований в систему вентилятор сильно гуде. 9. У разі відключення електрики обладнання припиняє роботу. Вирішити цю проблему допоможе придбання джерела безперебійного живлення. 10. Найпростішим вважається спосіб розпалювання з гнотом – з палаючим запальником. При спрацьовуванні автоматики, газ підпалюється гнотом, після чого прилад починає гріти воду. Негативних моментів у цьому два – підвищена витрата палива та недостатній ступінь безпеки, оскільки запальник може згаснути. Первинний розпал виконується сірниками або із застосуванням п'єзоелемента. Другим способом є електронний розпал газового приладу – його забезпечує високовольтний перетворювач, енергія для якого надходить за рахунок електрики або батарейок. 11. Живлення електроенергією здійснюється за допомогою магістральної електромережі, яка може відключатися.

Розглянувши усі недоліки вище наведеної технологічної схеми нами було прийняте рішення: 1) замінити двоконтурний котел з газовим пальником на систему, що забезпечує приватне домоволодіння: гарячою водою за допомогою електричного водонагрівника; опалювання за допомогою геотермального ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»; батареї опалювання на водяну теплу підлогу; магістральну електромережу на вітроенергетичну установку; 2) поліпшити конструкцію системи опалювання, застосувавши нове обладнання; 3) підвищити ККД теплового насоса за рахунок застосування нових матеріалів, теплоносіїв та іншого допоміжного обладнання; 4) виконати оптимізацію, інтеграцію та автоматизацію основних вузлів теплового насосу; 5) удосконалити роботу енергетичної установки за допомогою комп'ютерного керування; 6) зменшити вагтість установки за рахунок зниження матеріалоємності установки, застосування нових матеріалів і встановлення нового обладнання; 7) зробити теплотехнічні розрахунки теплового насосу; 8) зробити розрахунки вітроенергетичної установки; 9) розробити нову технологічну схему.

Для виконання поставлених умов видається доцільним розробка таких гібридних комбінованих конструкцій енергетичних установок, які дозволяли б мінімізувати витрати на їх виготовлення, монтаж, обслуговування та ремонт. Це може досягатися за рахунок використання дешевих вітчизняних матеріалів, випуск яких гарантовано в достатніх обсягах протягом тривалого терміну. У разі виходу із ладу такої енергетичної установки, в якості дублюючого джерела, використовуються існуючі традиційні джерела тепlopостачання (котельне обладнання і електронагрівальні установки) [8].

Нами був зроблений: розрахунок потужності теплового насоса [9] для системи опалювання приватного будинку [10] і був обраний тепловий насос марки NIBE F1345; розрахунок потужності електричного водонагрівника для системи гарячого водопостачання домоволодіння; розрахунок номінальної потужності вітрогенератора [11].

Принцип роботи малих вітроенергетичних установок (ВЕУ) даної технології полягає у перетворенні кінетичної енергії вітру в електричну. Вітрова установка має вітроколесо з лопатями, але починає обертатися (рухатися) під впливом вітру, а разом з ним ротор генератора [12]. Вироблений генератором електричний струм надходить на інвертор (або до акумуляторів, а потім на інвертор), де він перетворюється в змінний струм, необхідний для роботи побутових приладів та електропостачання будинку. Схема роботи даної технології показана на рис. 1.

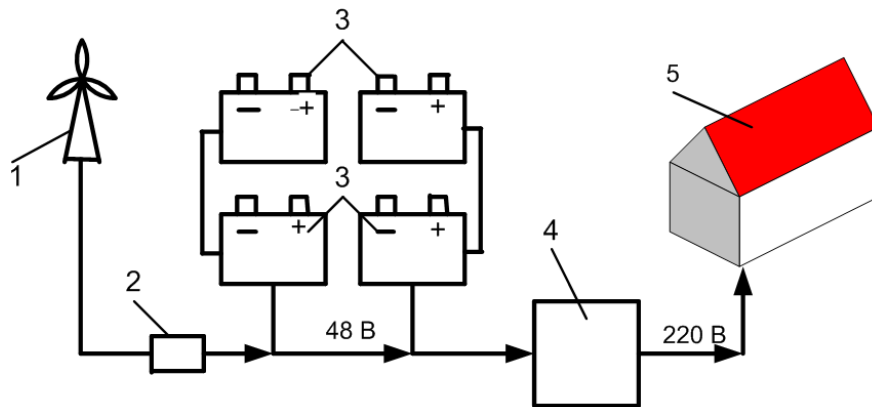


Рисунок 1 – Технологічна схема роботи даної технології

1 – Вітрогенератор (хаотична енергія вітру); 2 – Контролер; 3 – Акумулятори (постійний струм); 4 – Інвертор; 5 – Приватне домоволодіння (змінний струм)

Сучасні пристрої генерують енергію навіть за дуже слабкого вітру – від 3–4 м/с. Для вибору оптимального обладнання та місця розташування вітроустановок перед будівництвом на потенційній ділянці доцільно здійснити виміри швидкості вітру (потенціал) [13].

Вихідними даними для розробки вітроустановки для часткового забезпечення електроенергією приватного домоволодіння був розрахунок середньої швидкості вітру на основі даних про середню швидкість вітру за місяцями в м. Харків [14], що наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Середня швидкість вітру за місяцями

Мі-сяць	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
V_{cp} , м/с	5,06	5,25	5,11	4,44	3,92	3,78	3,67	3,78	4,14	4,39	4,58	4,83

Харків — місто не ідеально рівнинне, проте поблизу Харкова немає ніякої великої височини, яка би суттєво впливала на розу вітрів у місті. Середньорічна швидкість вітру дорівнює 4 м/с. Швидкість вітру дещо знижується у липні-серпні (3,67 м/с) та підвищується у лютому (5,25 м/с).

Згідно отриманих даних була розрахована середня швидкість вітру, м/с, за період, виключаючи 6–9 місяці через низьку швидкість вітру, що знижує економічну доцільність використання вітроагрегату.

$$v_{\text{ср}} = \frac{\sum v_{\text{ср}}}{n} = \frac{5,06 + 5,25 + 5,11 + 4,44 + 3,92 + 4,39 + 4,58 + 4,83}{8} = 4,69,$$

де $v_{\text{ср}}$ – середня швидкість вітру за n -й місяць; n – кількість місяців.

Важливою характеристикою є вертикальний профіль вітру, тобто зміна величини його швидкості за висотою. Тому для узгодження отриманих значень спостереження з висотою розташування вісі ротора застосовують залежність (1), що запропонована Д.Т. Лайхтманом [15]:

$$v = v_1 \cdot \frac{\lg \frac{h}{h_0}}{\lg \frac{h_1}{h_0}}, \quad (1)$$

де v – швидкість на висоті h , що визначається; v_1 – швидкість вітру, що вимірюється біля Землі на висоті h_1 ; h_0 - висота, на якій швидкість вітру дорівнює нулю (вона залежить від шорсткості поверхні: для снігового покриття – 0,5 см; для поверхні з низькою травою – 3,2 см; з більш високими рослинами – 5...7 см; $h_{\text{макс}} = 20$ см). Залежність швидкості вітру від висоти побудована за рівнянням (1) представлена на рис. 2.

Залежність швидкості вітру від висоти зображена на рис. 2

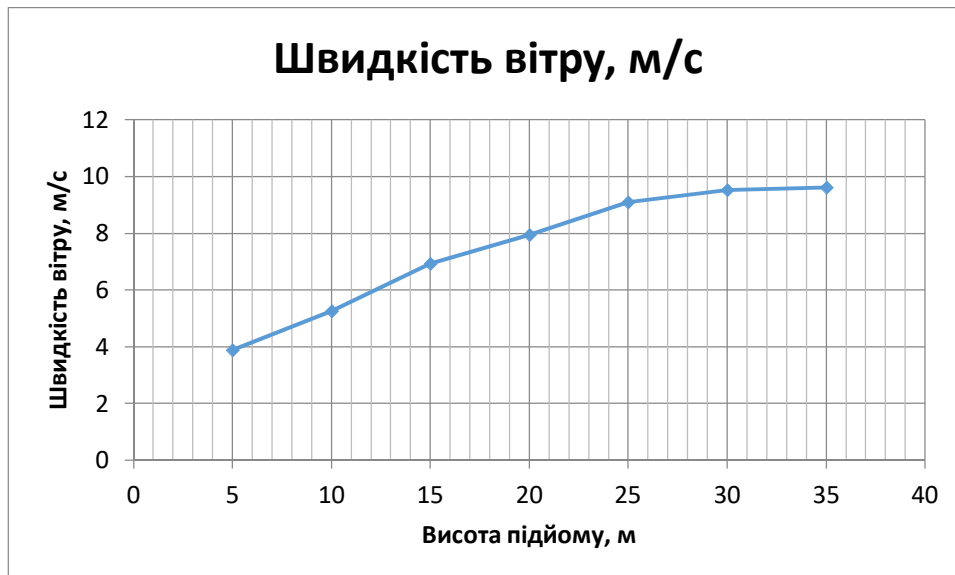


Рисунок 2 – Графік залежності швидкості вітру від висоти

Задля усунення можливих затіненнь вітроустановки перешкодами, піднімаємо на мінімальну висоту опори $h = 15$ м, на цій висоті згідно вище наведеної залежності швидкість вітру дорівнює $v = 6,92$ м/с.

Задля визначення номінальної потужності вітроустановки необхідно визначити часовий розподіл використання енергії споживачем та побудувати графік навантаження за допомогою якого визначається максимальна пікова потужність, що і відповідає номінальній потужності генератора. Детальний розподіл використання енергії споживачем наведений в таблиці 2.

Таблиця 2 – Детальний розподіл використання енергії споживачем

Найменування	Кількість, шт	Потужність, Вт
Водяний насос	5	10000
Апарат хімводоочистки	2	1000
Компресор	1	2000
Холодильник	1	250
Кондиціонер	2	700
Пральна машина	1	2000
Посудомийка	1	800
Кавоварка	1	1100
Мікрохвильовка	1	700
Праска	1	1500
Пилосос	1	700
Бойлер	1	2000
ТБ	2	65
Роутер	2	7
Ноутбук	2	50
Освітлення	20	200
Теплової насос	1	5000
Дрель	1	2000
Болгарка	1	3000

В таблиці 2 зображений детальний розподіл використання енергії споживачем, згідно якому максимальна потужність досягає 10 кВт, додаємо ще 20 %, згідно каталогу генераторів обираємо 12 кВт. Дана потужність може бути розрахована також в залежності від потреб споживача.

Нами була розроблена нова технологічна схема гібридної енергетичної системи гарячого водопостачання та опалення приватного будинку [16].

Зробимо опис роботи нової технологічної схеми, яка представлена на рис. 3.

Нова гібридна енергетична установка може працювати як сезонно, так і цілий рік.

Принцип роботи установки при сезонній роботі в теплу пору року.

Вода із свердловини 1 циркуляційним насосом 2 подається в апарат хімводоочищення 3, де очищується від багатьох солей і надходить в бак-акумулятор 4. Далі циркуляційним насосом 5 вода подається в електричний водонагрівник 6, де нагрівається до

температури 75 °С і далі поступає в бак-акумулятор 7. З бака-акумулятора 7 циркуляційним насосом 9 вода подається у другий контур 10 охолоджувача і другий контур 12 конденсатора ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода» і поступає користувачу 17 на гаряче водопостачання і опалення. Зворотна вода від користувача 17 подається в установку хімоводоочищення 18, де очищається, і циркуляційним насосом 19 по трубопроводам 26 подається в бак-акумулятор 4. У разі аварійної ситуації є можливість випустити теплоносії у каналізацію 8 (злив води із системи). У разі підвищення температури повітря на вулиці до некомфортної позначки, включається у тепловому насосі режим кондиціонування. Вода із ґрунтового теплообмінного колектора 25 циркуляційним насосом 23 подається в контур теплового полу, охолоджує площу полу і повітря в кімнатах будинку до комфортної температури.

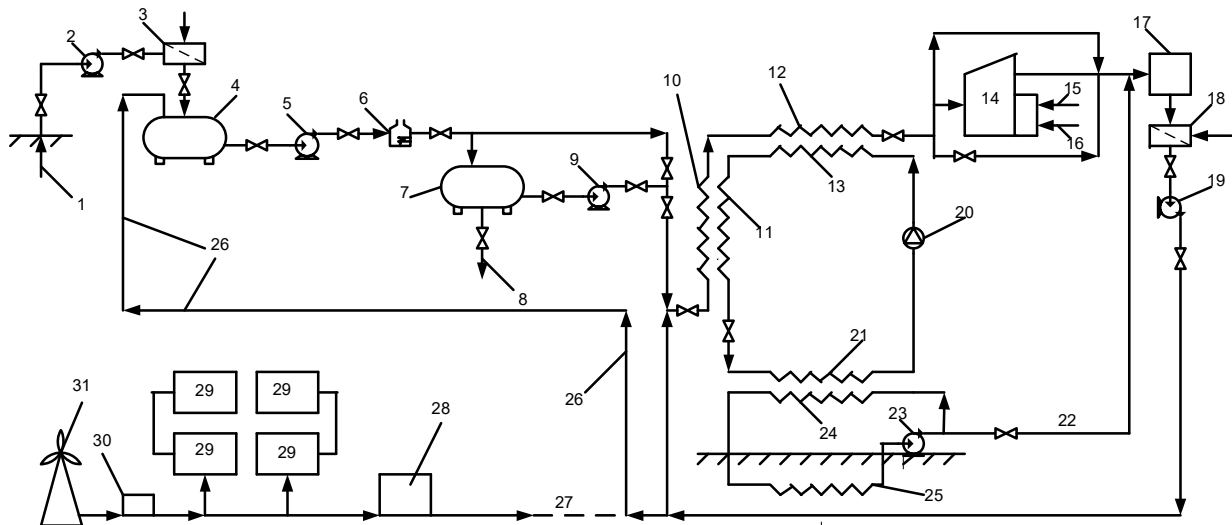


Рисунок 3 – Технологічна схема нової гібридної енергетичної установки

- 1 – Свердловина води; 2 – Циркуляційний насос; 3, 18 – Апарати хімоводоочищення;
- 4 – Бак-акумулятор; 5 – Циркуляційний насос; 6 – Електричний водонагрівник;
- 7 – Бак-акумулятор; 8 – Злив теплоносія з установки; 9 – Циркуляційний насос;
- 10 – Другий контур підігрівача ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»;
- 11 – Перший контур підігрівача ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»;
- 12 – Другий контур конденсатора ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»;
- 13 – Перший контур конденсатора ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»;
- 14 – Тепловий дублер; 15 – Газовий пальник; 16 – Подача повітря в тепловий дублер;
- 17 – Приватне домоволодіння; 19 – Циркуляційний насос; 20 – Компресор ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»; 21 – Перший контур випарника ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»;
- 22 – Трубопровід подачі холодного теплоносія (режим кондиціонування);
- 23 – Циркуляційний насос; 24 – Другий контур випарника ґрунтового теплового насоса «ґрунт-вода»;
- 25 – Теплообмінний колектор теплового контуру ґрунтового теплового насоса;
- 26 – Трубопровід оборотного теплоносія; 27 – Електрокабелі змінного струму 220 В;
- 28 – Інвертор; 29 – Акумулятори постійного струму 48 В; 30 – Контролер; 31 – Вітроустановка

Принцип роботи установки для цілорічної роботи.

В теплу пору року принцип роботи установки показаний вище. А в холодну пору року установка працює таким чином.

Вода з температурою 5–7 °С теплообмінного колектора 25 ґрунтового теплового насоса циркуляційним насосом 23 подається в другий контур 24 випарника теплового насоса, де нагріває холодоагент першого контуру 21, який перетворюється в пару. Пара холодоагенту надходить у компресор 20, де стискається до високої 160 °С температури та тиску. Далі пара надходить у перший контур 13 конденсатора теплового насоса, де віддає своє тепло другому контуру 12 конденсатора [17], в який подається вода циркуляційним насосом 9 з бака-акумулятора 7, або циркуляційним насосом 19 від користувача 17. Таким чином, вода нагрівається спочатку в другому контурі 12 конденсатора, а потім у другому контурі 10 охолоджувача і надходить до користувача 17 з температурою 75 °С. Коли з ладу виходить тепловий насос і електричний водонагрівник 6, то в якості теплового дублера виступає котельна установка 14 з газовим пальником 15 і повітряним наддувом 16, яка підігріває воду до необхідної температури і подає її в систему гарячого водопостачання та опалення приватного домоволодіння. У разі аварійної ситуації є можливість випустити теплоносій у каналізацію 8 (злив води із системи). Бак-акумулятор складається з теплоізольованого резервуару для зберігання акумулюючого середовища (гарячої води), пристроїв для зарядки і розрядки і допоміжного обладнання. Теплове акумулювання - це фізичні або хімічні процеси, за допомогою яких відбувається накопичення тепла в тепловому акумуляторі енергії. Акумулююча система характеризується способами, якими енергія для зарядки акумулятора відбирається від джерела, трансформується (при необхідності) в необхідний вид енергії і віддається споживачеві.

У вибраних нами баках-акумуляторах відбувається накопичення і пряме акумулювання тепла, оскільки акумулюючою і теплообмінною є одне і те ж середовище [17]. Акумулююча середа може бути твердою, рідкою, газоподібною або двофазною (рідина плюс газ). У нашому проекті акумулююча середа – рідина.

Розроблена та вибрана нами віпроустановка дозволяє забезпечувати приватне домоволодіння з господарством електроенергією та накопичувати її в акумуляторах постійного струму 29 потужністю 48 В. Контролер 30 та інвертор 28 дозволяє подавати необхідну електрику потужністю 220 В через електрокабелі змінного струму 27 в приватне домоволодіння 17.

Таким чином, тепла енергія енергетичної установки гарячого водопостачання складалася з теплової енергії встановленої електричним водонагрівником і теплової енергії теплового насоса і розраховувалася за рівнянням

$$Q_T = Q_1 + Q_2 \quad (2)$$

Значення кількості використаної теплоти для попереднього підігріву води визначали за формулою

$$Q_1 = G_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_B'' - t_B'), \quad (3)$$

де G_B – загальна витрата води, що підігрівається, м³/с; ρ_B – щільність води, кг/м³; c_B – питома теплоємність води, кДж/(м³·К); t_B', t_B'' – температура холодної та підігрітої води, відповідно, °С.

Значення кількості використаної теплоти в тепловому насосі визначали за формулою

$$Q_2 = \xi \cdot N_{\text{ЭЛ}}, \quad (4)$$

де ξ – коефіцієнт перетворення теплового насоса; $N_{\text{ЭЛ}}$ – енергія, витрачена для реалізації циклу теплового насоса.

Економію палива у котлоагрегатах за рахунок використання такої системи можна розрахувати за допомогою рівнянь теплового балансу (1–4). Річна економія умовного палива становитиме, т. у. п./рік

$$\Delta B_{\text{рік}} = \frac{Q_{\text{рік}}}{Q_H^P \cdot \eta_K}, \quad (5)$$

де $Q_H^P = 29,33$ МДж/кг – теплотворна здатність умовного палива; $Q_{\text{рік}}$ – річна кількість утилізованої теплоти, МДж/рік; η_K – коефіцієнт корисної дії котла.

Економія органічного палива дорівнює, т/рік (тис. м³/рік):

$$\Delta B = \Delta B_{\text{рік}} \cdot \frac{29,33}{1000 \cdot Q_H^P}. \quad (6)$$

Річна економія за рахунок скорочення витрати первинного палива для підігріву води складе для котельні, грн/рік

$$E_{\text{П}} = \Delta B \cdot C_{\text{П}}, \quad (7)$$

де $C_{\text{П}}$ – вартість первинного палива, грн/т (грн/1000 м³).

Термін окупності енергетичної установки гарячого водопостачання та опалення приватного будинку становитиме рік.

$$T = S_C / (Q_T \cdot C_T), \quad (8)$$

S_C – питома вартість теплоенергетичної системи гарячого водопостачання, грн/м²;

Q_T – річна кількість теплоти, яка вироблена енергетичною установкою, Гкал/м²;

C_T – вартість теплоти від традиційного енергоджерела, грн/Гкал.

Висновки. Нова гібридна енергетична установка забезпечує приватне домоволодіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівачем використовується тепловий насос, акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо; виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Система автоматизації дозволяє керувати гібридною установкою без втручання людини цілий рік.

Термін окупності теплоенергетичної установки становитиме 3,14 року.

Література

1. Городов Р.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – 1-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
2. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент / Пер. с англ. Под ред. М.М. Колтуна. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
3. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 1071. – 166 с.
4. Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії / За заг. Ред.. С.О.Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
5. Кудря С.О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії: підр. / С.О. Кудря. К. : НТУУ «ХП», 2012. – 492 с.
6. Селихов Ю.А., Ведь В.Е., Бухало С.И., Костин В.М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. - Экотехнологии и ресурсосбережение, Киев, Типография НАН Украины, № 3, 2004 г., с. 70–75.
7. Селихов Ю.А. Горбунов К.О., Стасов В.А. Интеграция работы поновлюваемых джерел енергії для горячего водопостачання та опалювання будівель. ІТЕ №4 2021, С. 3-12.
8. Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Рябова И. Б. Интеграция и оптимизация работы системы отопления коттеджа. – Харьков, ИТЕ №3, 2017, С. 15-20.
9. Васьков Е.Т. Термодинамические основы тепловых насосов: учеб. пособ. / СПб., 2007. – 127 с.
10. Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Рябова И. Б. Интеграция и оптимизация работы системы отопления коттеджа. – Харьков, ИТЕ №3, 2017, С. 15–20.
11. Невичерпна енергія. Вітроенергетика. / В.С. Кривцов, О.М. Олейніков, О.І. Яковлев – Х.: Національний аерокосмічний університет «ХАІ», Севастопольський національний технічний університет, 2004. – 519 с.
12. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
13. Оценка технического уровня ветродвигателей / А.И. Абдуллаев, А.М. Наджафов, А.А. Саламов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Проблеми механічного приводу. – Х.: НТУ «ХП». – 2013. – №41(1014). – С. 3–6. – Бібліогр.: 7 назв.
14. Клімат Харкова // Харківський регіональний центр з гідрометеорології. URL: <http://kharkiv.meteo.gov.ua/klimat-kharkova/>.
15. да Роза А. Возобновляемые источники энергии. Физико-технические основы: учебное пособие / А. да Роза; пер. с англ. Под ред. С.П. Мальшенко, О.С. Попеля. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект»; М.; Издательский дом МЭИ; 2010. – 704 с.
16. Теплоснабжение: Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая; Под ред. А.А. Ионина. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.
17. Теплоэнергетика и теплотехника: Справочник. Кн.2: Теоретические основы теплотехники. Теплофизический эксперимент. – М.: МЭИ. 2001. – 564 с.

Bibliography (transliterated)

1. Gorodov R.V. Netraditsionnyie i vobnovlyaemyie istochniki energii: uchebnoe posobie / R.V. Gorodov, V.E. Gubin, A.S. Matveev. – 1-e izd. – Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2009. – 294 p.

2. Farenbruh A., Byub R. Solnechnyye elementy: Teoriya i eksperiment / Per. s angl. Pod red. M.M. Koltuna. – M.: Energoatomizdat, 1987. – 280 p.
3. Energetichna strategiya Ukrainy na period do 2030 r. Shvaleno rozporядzhenniam Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 24.07.2013 # 1071. – 166 p.
4. Kudrya S.O. Vidnovlyuvani dzherela energiyi / Za zag. Red.. S.O.KudrI. – Kiyiv: Institut vidnovlyuvanoyi energetiki NANU, 2020. – 392 p.
5. Kudrya S.O. Netraditsiyini ta vidnovlyuvani dzherela energiyi: pidr. / S.O. Kudrya. K. : NTUU «KPI», 2012. – 492 p.
6. Selihov Yu.A., Ved V.E., Buhkalo S.I., Kostin V.M. Konstruktsionnyie osobennosti uvelicheniya effektivnosti raboty gelioustanovok. – Ekotehnologii i resursosberezhenie, Kiev, Tipografiya NAN Ukrainy, # 3, 2004 g., p. 70–75.
7. Selihov Yu.A. Gorbunov K.O., Stasov V.A. Integratsiya roboti ponovlyuvanih dzherel energiyi dlya garyachogo vodopostachannya ta opalyuvannya budivel. ITE #4 2021, P. 3–12.
8. Selihov Yu.A., Kotsarenko V.A., Gorbunov K.A., Ryabova I.B. Integratsiya i optimizatsiya raboty sistemyi otopleniya kottedzha. – Harkov, ITE #3, 2017, P. 15–20.
9. Vaskov E.T. Termodinamicheskie osnovy teplovyih nasosov: ucheb. posob. / SPb., 2007. – 127 p.
10. Selihov Yu.A., Kotsarenko V.A., Gorbunov K.A., Ryabova I.B. Integratsiya i optimizatsiya raboty sistemyi otopleniya kottedzha. – Harkov, ITE #3, 2017, P. 15–20.
11. Nevicherpna energiya. Vitroenergetika. / V.S. Krivtsov, O.M. Oleynikov, O.I. Yakovlev – H.: Natsionalny aerokosmichnyy universitet «NAI», Sevastopolskiy natsionalnyy tehnikniy universitet, 2004. – 519 p.
12. Haritonov V.P. Avtonomnyie vetroelektricheskie ustanovki. – M.: GNU VIESH, 2006. – 280 p.
13. Otsenka tehničeskogo urovnya vetrodvigateley / A.I. Abdullaev, A.M. Nadzhafov, A.A. Salamov // Visnik NTU «HPI». SerIya: Problemi mehanichnogo privodu. – H.: NTU «HPI». – 2013. – #41(1014). – P. 3–6. – Bibllogr.: 7 nazv.
14. Klimat Harkova // Harkivskiy regionalniy tsentr z gidrometeorologiyi. URL: <http://kharkiv.meteo.gov.ua/klimat-kharkova/>.
15. da Roza A. Vozobnovlyaemyie istochniki energii. Fiziko-tehnicheskie osnovy: uchebnoe posobie / A. da Roza; per. s angl. Pod red. S.P. Malyishenko, O.S. Popelya. – Dolgoprudnyy: Izdatelskiy dom «Intellekt»; M.; Izdatelskiy dom MEI; 2010. – 704 p.
16. Teplosnabzhenie: Uchebnik dlya vuzov / A.A. Ionin, B.M. Hlyibov, V.N. Bratenkov, E.N. Terletskaaya; Pod red. A.A. Ionina. – M.: Stroyizdat, 1982. – 336 p.
17. Teploenergetika i teplotehnika: Spravochnik. Kn.2: Teoreticheskie osnovy teplotehniki. Teplofizicheskiy eksperiment. – M.: MEI. 2001. – 564 p.

УДК 662.997

Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор, К. О. Горбунов, к.техн.н., професор,
В. А. Стасов, магістр

ІНТЕГРАЦІЯ РОБОТИ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

Комплексне використання означає використання кількох джерел енергії, усіх одночасно чи в певних комбінаціях. При цьому можливе використання виключно відновлюваних джерел, що значно обмежує можливості користувача. Більш поширеним та виправданим з багатьох точок зору є застосування як відновлюваних, так і

традиційних джерел, автономних (універсальних котлів, дизель-генераторів, газотурбінних установок, тощо) чи централізованих (електромережі) джерел. Коректна оцінка такої комбінованої енергосистеми вимагає врахування також головного компонента системи – споживача, тобто врахувати особливості місцевої мережі та наближених споживачів, що на режим роботи комплексу відновлюваних джерел матиме безпосередній або відчутний опосередкований вплив. Для забезпечення належної якості енергоживлення можуть застосовуватися системи акумулювання енергії, а потреба в них залежить від дискретності енергетичних потоків та вимог до якості живлення. У закордонній термінології комбіновані системи часто називають гібридними, що відображає різноманіття як джерел енергії, так і способів їх поєднання (іноді ця назва поширюється на довільні комплекси). Однак звичайно під терміном «гібридне енергоживлення» мають на увазі поєднання установок, що використовують відновлювані та традиційні джерела енергії.

В статті представлена нова гібридна енергетична установка, яка забезпечує приватне домоволодіння електроенергією, гарячим водопостачанням, опаленням та гарячим повітрям у необхідному діапазоні температур для комфортного проживання. Спільно з вітроелектрогенератором, електричним водонагрівачем використовується тепловий насос, акумулятори електроенергії та теплоти, що дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріаломісткості та витрат на обладнання, економити органічне паливо; виробляти електроенергію та надлишок її віддавати в державну електромережу; зменшити теплове навантаження та забруднення навколишнього середовища. Система автоматизації дозволяє керувати гібридною установкою без втручання людини цілий рік.

Ключові слова: гібридна енергетична установка, приватне домоволодіння, електроенергія, гаряче водопостачання, опалення, гаряче повітря, електричний водонагрівач, вітроелектрогенератор, органічне паливо, тепла енергія, теплове навантаження, державна електромережа, навколишнє середовище, система автоматизації.

Ю. А. Селихов, к.техн.н., професор, К. А. Горбунов, к.техн.н., професор,
В. А. Стасов, магістр

ИНТЕГРАЦИЯ РАБОТЫ ГИБРИДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Комплексное использование означает использование нескольких источников энергии, всех одновременно или в некоторых комбинациях. При этом возможно использование исключительно возобновляемых источников, что значительно ограничивает пользовательские возможности. Более распространенным и оправданным с многих точек зрения является применение как возобновляемых, так и традиционных источников, автономных (универсальных котлов, дизель-генераторов, газотурбинных установок и т.п.) или централизованных (электросети) источников. Корректная оценка такой комбинированной энергосистемы требует учета также главного компонента системы – потребителя, то есть учесть особенности местной сети и приближенных потребителей, что на режим работы комплекса возобновляемых источников будет иметь непосредственное или ощутимое опосредованное влияние. Для обеспечения надлежащего качества питания могут применяться системы аккумулирования энергии, а потребность в них зависит от дискретности энергетических потоков и требований к качеству питания. В зарубежной терминологии комбинированные системы часто называют гибридными, отражающими многооб-

разие как источников энергии, так и способов их сочетания (иногда это название распространяется на произвольные комплексы). Однако обычно под термином «гибридное энергопитание» подразумевают сочетание установок, использующих возобновляемые и традиционные источники энергии.

В статье представлена новая гибридная энергетическая установка, обеспечивающая частное домовладение электроэнергией, горячим водоснабжением, отоплением и горячим воздухом в требуемом диапазоне температур для комфортного проживания. Совместно с ветроэлектрогенератором, электрическим водонагревателем используется тепловой насос, аккумуляторы электроэнергии и теплоты, что позволяет: - уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет снижения материалоемкости и затрат на оборудование, экономить органическое топливо; производить электроэнергию и излишек ее отдавать в государственную электросеть; уменьшить тепловую нагрузку и загрязнение окружающей среды. Система автоматизации позволяет управлять гибридной установкой без вмешательства человека круглогодично.

Ключевые слова: гибридная энергетическая установка, частное домовладение, электроэнергия, горячее водоснабжение, отопление, горячий воздух, электрический водонагреватель, ветроэлектрогенератор, органическое топливо, тепловая энергия, тепловая нагрузка, государственная электросеть, окружающая среда, система автоматизации.

Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov, V. A. Stasov

INTEGRATION OF HYBRID ENERGY PLANT OPERATION

Integrated use means the use of several energy sources, all at the same time or in some combination. At the same time, it is possible to use exclusively renewable sources, which significantly limits user capabilities. More common and justified from many points of view is the use of both renewable and traditional sources, autonomous (universal boilers, diesel generators, gas turbine units, etc.) or centralized (power grid) sources. A correct assessment of such a combined energy system also requires taking into account the main component of the system - the consumer, that is, taking into account the features of the local network and nearby consumers, which will have a direct or tangible indirect effect on the operating mode of the complex of renewable sources. To ensure adequate power quality, energy storage systems can be used, and the need for them depends on the discreteness of energy flows and the requirements for power quality. In foreign terminology, combined systems are often called hybrid, reflecting the diversity of both energy sources and methods of combining them (sometimes this name extends to arbitrary complexes). However, the term “hybrid power supply” usually refers to a combination of installations using renewable and traditional energy sources.

The article presents a new hybrid energy system that provides private households with electricity, hot water supply, heating and hot air in the required temperature range for comfortable living. Together with a wind power generator and an electric water heater, a heat pump, electricity and heat accumulators are used, which allows: - reducing the cost of thermal energy by reducing material consumption and equipment costs, saving organic fuel; produce electricity and send the excess to the state power grid; reduce heat load and environmental pollution. The automation system allows you to control the hybrid installation without human intervention all year round.

Keywords: hybrid power plant, private households, electricity, hot water supply, heating, hot air, electric water heater, wind power generator, fossil fuel, thermal energy, heat load, state power grid, environment, automation system.

О. В. Кошельник^{1,2}, к.техн.н., доцент, О. В. Жуков¹, аспірант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

¹*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків*

²*Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна*

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, теплоакumuлюючий елемент, фазовий перехід, ефективність.

Вступ

Робота сучасних доменних печей характеризується невисокою температурою димових газів, що відходять, внаслідок чого неможливо забезпечити технологічно необхідний рівень температури нагріву гарячого дуття. Експлуатація печей супроводжується утворенням значних обсягів побічного продукту – доменного газу, який може бути використаний безпосередньо на металургійному підприємстві в якості джерела теплової енергії. З урахуванням цього в системах повітропостачання доменних печей використовуються регенеративні повітрянагрівачі, температура підігріву гарячого дуття в яких становить 1150–1350 °С. Існуючий рівень нагріву дуття визначає продуктивність доменних печей та питому витрату металургійного коксу в них. Тому розробка заходів для підвищення температури гарячого дуття в системах повітропостачання доменних печей є сьогодні актуальним завданням [1–4].

Виділення невирішеної частини загальної проблеми

В роботі [2] докладно проаналізовані основні напрямки підвищення ефективності роботи доменних повітрянагрівачів. Це покращення рівномірності розподілу теплоносіїв у поперечному перерізі насадки теплообмінників (ТО), використання зовнішньої рециркуляції продуктів згоряння у повітрянагрівачах, використання відхідних агломераційних газів у повітрянагрівачах в якості окислювача при спалюванні палива, оптимізація тривалості циклів роботи блоку доменних повітрянагрівачів. Всі ці заходи мають свої певні переваги і недоліки та знайшли використання на різних металургійних підприємствах.

На експлуатаційні та техніко-економічні показники роботи регенеративних теплообмінників впливає ряд факторів – геометричні та конструктивні характеристики теплоакumuлюючих елементів ТО, тип вогнетривких матеріалів насадки. Насадки прагнуть виконати з можливо більшою поверхнею нагріву в одиниці об'єму та забезпечити високий коефіцієнт теплообміну між теплоносієм і вогнетривом. Сьогодні у повітрянагрівачах доменних печей застосовується блокова насадка, що виконується із динасових, магнетитових або шамотних вогнетривів [5, 6].

Перспективних напрямком підвищення теплової ефективності повітрянагрівачів доменних печей може стати використання в насадках теплоакumuлюючих елементів з використанням явища фазового переходу. Подібні конструкції застосовуються для акумулювання теплоти в геліосистемах, також пропонувалися схеми з тепловими акумуляторами для регенеративних теплообмінників скловарних печей та систем регенерації пе-

рехідних процесів термосорбційних компресорів [7–11]. Основою теплового акумулятора є окремі вогнетривкі елементи, у внутрішній частині яких знаходяться плавкі сполуки. Ємність такого акумулятору визначається не зміною температури, а зміною агрегатного стану речовини, що акумулює. До переваг подібних акумулюючих систем можна віднести досить високу теплову ємність, незначні габарити та низький тиск. Але сьогодні досі не вирішені проблеми теплообміну з акумулюючим середовищем та в деяких випадках – високої вартості теплоакumuлюючих елементів. Завдяки наявності теплового ефекту від фазового переходу, загальна кількість акумульованої теплоти буде набагато більшою в порівнянні зі звичайними елементами із вогнетривких матеріалів.

Найбільш ефективним є акумулювання теплоти при переході речовин із рідкого агрегатного стану в газоподібний, однак воно не знайшло широкого застосування внаслідок досить низької об'ємної теплоємності газів. Таким чином, в теплових акумуляторах використовують в більшості випадків теплоту плавлення речовин при переході з твердого стану в рідкий, що відбувається із незначними змінами об'ємів. Тому дані теплові акумулятори можна віднести до пристроїв, що мають постійні масу та тиск [7].

Маса акумулюючого матеріалу насадки пропорційна щільності потоку теплової енергії і коефіцієнту корисної дії циклу акумулювання. У процесах, що реально відбуваються, щільність енергії значно нижче теоретично розрахованого значення із-за присутності втрат теплоти, а також неминучих втрат в процесах зарядки та розрядки теплового акумулятору.

Існують ряд хімічних сполук, при застосуванні яких для акумулювання теплоти, забезпечується високий показник щільності теплової енергії, незначні зміни температур і стабільність температурного рівня теплоносія після акумулятора. Але все ж таки значна кількість теплоакumuлюючих матеріалів (ТАМ) у рідкому агрегатному стані становляться корозійно-активними, мають низькі теплофізичні властивості, змінюють об'єм при переході з одного агрегатного стану до іншого та мають високу вартість. Таким чином, питання вибору оптимальних теплоакumuлюючих матеріалів з урахуванням особливостей експлуатації повітрянагрівачів доменних печей є основною проблемою при проектуванні теплообмінних апаратів подібного типу, яка потребує подальшого дослідження.

Викладення основної частини дослідження

На рисунку 1 представлений типовий розподіл температури по висоті теплообмінника $H / H_{\text{заг}}$ у відносних величинах для 2 варіантів: із традиційною насадкою та регенератора, де насадка виконана із матеріалу з фазовим переходом [8]. Тут показані температурні криві наприкінці періодів нагріву та охолодження. Як видно з рисунку, за рахунок використання матеріалів з плавкою вставкою вдається значно збільшити кількість акумульованої теплоти.

Зміна ентальпії в системі «тверде тіло-рідина» від початкової температури t_1 до кінцевої t_2 в даному випадку описується рівнянням

$$\Delta h = c_{p_{me}} \cdot (t_{\phi} - t_1) + h_{\phi} + c_{p_p} \cdot (t_2 - t_{\phi}),$$

де $c_{p_{me}}$ – масова теплоємність речовини у твердому стані при $p = const$, кДж/(кг·К); h_{ϕ} – ентальпія фазового переходу, відповідає температурі плавлення матеріалу насадки t_{ϕ} , кДж/кг; c_{p_p} – масова теплоємність речовини у рідкому стані при $p = const$, кДж/(кг·К).

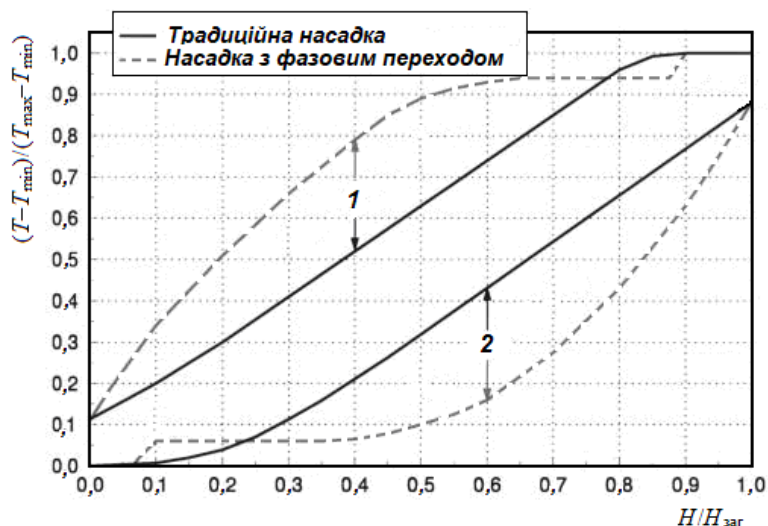


Рисунок 1 – Осьовий розподіл температури в насадках регенеративного теплообмінника:
1 – період нагріву; 2 – період охолодження

Величина $c_{p_{мс}} \cdot (t_{\phi} - t_1)$ показує зміну внутрішньої енергії сполук в твердому стані, h_{ϕ} – теплоту фазового переходу, а $c_{p_p} \cdot (t_2 - t_{\phi})$ – зміну внутрішньої енергії сполук в рідкому стані.

Важливе значення при проведенні розрахункових досліджень має коректне визначення величини h_{ϕ} . Для чистих речовин були отримані такі наближені співвідношення:

– для органічних

$$h_{\phi} \approx 0,7 \cdot T_{\phi};$$

– для неорганічних

$$h_{\phi} \approx (24 / M) \cdot T_{\phi},$$

де M – молекулярна маса, кмоль [7].

Для матеріалів, в яких використовується теплота фазового переходу, важливими є такі властивості: високі значення ентальпії фазового переходу; певна температура плавлення, що повинна відповідати умовам експлуатації установки; високі значення коефіцієнту теплопровідності та теплоємності в обох фазах; неможливість процесу перегріву при плавленні; відсутність тенденції до розділу на різні шари; низьке термічне розширення; незначна зміна об'єму матеріалу при переході від однієї фази до іншої; температурна стабільність; незначна хімічна активність; безпечні умови експлуатації (відсутність отруйної пари, реакцій з робочим або теплообмінним середовищем з виділенням небезпечних речовин); низька вартість.

Сьогодні відомий досить широкий спектр речовин, що забезпечують температуру акумуляції в діапазоні температур до 1250 °С. У таблиці 1 наведені характеристики деяких хімічних сполук, що можуть бути застосовані в якості теплоакумулюючої насадки з фазовим переходом при високих температурах [2, 9, 12].

Таблиця 1 – Теплофізичні властивості деяких сполук для застосування в насадках з фазовим переходом

Хімічна сполука	Температура плавлення t_{ϕ} , °C	Теплота фазового переходу, кДж/кг
NaF/MgF ₂	832	618
LiF	850	1044
KF	858	468
K ₂ CO ₃	897	236
Na ₂ SiO ₃	1068	427
K ₂ SO ₄	1069	212
K ₂ SO ₄ /MgO	1070	104
Na ₂ Ti ₃ O ₇	1128	515
Fe ₂ SiO ₄	1200	456
Fe ₃ C	1227	286
MgF ₂	1236	918

Використання різних ТАМ потребує розробки конструкцій, спрямованих на максимальне використання переваг акумулюючих матеріалів і мінімізації їх недоліків. Вогнетривкі вироби із «плавкої» кераміки можуть випускатися як у вигляді стандартної цегли, так і у вигляді формових блоків. Були запропоновані різні варіанти застосування насадок з плавкими вставками. Найбільш ефективним є використання насадок з таких матеріалів у зоні найбільших перепадів температур, тобто вгорі та в нижній частині регенератора. Але, враховуючи те, що загальна висота насадки доменних повітрянагрівачів може сягати до 45 м, а її вага складає декілька тон, доцільним буде використання насадки з плавкою вставкою тільки у верхній частині теплообмінника для запобігання його руйнування

Висновок

Застосування теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом в регенеративних теплообмінних апаратах може бути одним з перспективних напрямків підвищення ефективності роботи систем повітропостачання доменних печей за умов коректного вибору відповідних хімічних сполук або їх суміші. Для підтвердження стабільності експлуатації регенеративних повітрянагрівачів з насадкою з фазовим переходом необхідно провести додаткове розрахунково-теоретичне дослідження роботи теплообмінника, що включає моделювання складних теплових процесів в його насадці. Це можливо здійснити за допомогою математичної моделі та відповідного програмного комплексу, створеного автором дослідження [6].

Таким чином, необхідною умовою застосування в регенеративних повітрянагрівачах систем доменних печей теплоакumuлюючих елементів з фазовим переходом є аналіз теплофізичних та техніко-економічних факторів, що впливають на вибір матеріалів для забезпечення довготривалої експлуатації теплообмінних апаратів за умов мінімізації їх вартості.

Література

1. Грес Л.П., Карпенко С.А., Миленина А.Е. Теплообменники доменных печей. Днепропетровск : Пороги, 2012. 491 с.
2. Грес Л.П. Высокоэффективный нагрев дутья: монография. Днепропетровск : Пороги, 2008. 492 с.
3. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb. Essen : Vulkan-Verlag, 1994. 800 s.
4. Ganzha A., Zaiets O., Koshelnik A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems // Technology audit and production reserves. 2017. Vol.1 (33). P. 48–54.
5. Карпенко С.А., Грес Л.П., Быстров А.Е., Воробьева Л.А. Исследование и совершенствование насадок регенераторов путем выбора рациональных размеров ячеек // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2016. № 4. С. 108–110.
6. Кошельник О.В., Хавін Є.В., Павлова В.Г. Моделювання роботи теплообмінних апаратів систем енерго- та тепlopостачання високотемпературних технологічних установок // *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2015. № 1. С. 14–18.
7. Бекман У., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии. М. : Мир. 1987. 224 с.
8. Graeter F., Rheinländer J. Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von 150 bis 400 °C // *Forschungs. Verbund. Sonnenenergie. Workshop Wärmespeicherung*. Köln, 2001. P. 65–75.
9. Paksoy H.O. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Fundamentals, Case Studies and Design // *NATO Science Series. Series II: Mathematics, Physics and Chemistry*. 2002. Vol. 234. 428 p.
10. Кошельник О.В. Розробка енергоефективних термосорбційних компресорів з системою регенерації теплоти перехідних процесів // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2010. № 52. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». С. 16–20.
11. Кошельник О.В., Гойсан С.Б., Пугачова Т.М., Круглякова, О.В. Павлова В.Г. Особливості застосування теплоакумулюючих елементів з фазовим переходом в регенеративних теплообмінниках скловарних печей // *Інтегровані технології та енергозбереження*. 2022. № 1. С. 63–70.
12. Kenisarin M.M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010). P. 955–970.

Bibliography (transliterated)

1. Hres L.P., Karpenko S.A., Mylenyna A.E. Teploobmenniki domennykh pechey. Dnepropetrovsk : Porohy, 2012. 491 p.
2. Hres L.P. Vysokoeffektivnyy nagrev dutya: monografiya. Dnepropetrovsk : Porohy, 2008. 492 p.
3. Brunklaus H. Industrieofen. Bau und Betrieb. Essen : Vulkan-Verlag, 1994. 800 p.
4. Ganzha A., Zaiets O., Koshelnik A. Analysis of efficiency and reliability of blast-furnace process waste heat recovery systems // *Technology audit and production reserves*. 2017. Vol.1 (33). P. 48–54.
5. Karpenko S.A., Hres L.P., Bistrov A.E., Vorobyova L.A. Yssledovanye i sovershenstvovanye nasadok reheneratorov putem vibora ratsyonalnikh razmerov yacheek // *Metallurhycheskaia y hornorudnaia promishlennost*. 2016. № 4. P. 108–110.

6. Koshelnik O.V., Khavin Ye.V., Pavlova V.H. Modeliuvannia roboty teploobminnykh aparativ system enerho- ta teplopostachannia vysokotemperaturnykh tekhnolohichnykh ustanovok // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. 2015. № 1. P. 14–18.
7. Bekman U., Hylly P. Teplovoe akkumulyrovanye enerhyu. M. : Myr. 1987. 224 p.
8. Graeter F., Rheinländer J. Thermische Energiespeicherung mit Phasenwechsel im Bereich von 150 bis 400 °C // Forschungs Verbund Sonnenenergie. Workshop Wärmespeicherung. Köln, 2001. P. 65–75.
9. Paksoy H.O. Thermal Energy Storage for Sustainable Energy Consumption. Fundamentals, Case Studies and Design // NATO Science Series. Series II: Mathematics, Physics and Chemistry. 2002. Vol. 234. 428 p.
10. Koshelnik O.V. Rozrobka enerhoefektyvnykh termosorbtsiinykh kompresoriv z systemoiu reheneratsii teploty perekhidnykh protsesiv // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». 2010. № 52. Tematychnyi vypusk «Khimii, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia». P. 16–20.
11. Koshelnik O.V., Hoisan S.B., Puhachova T.M., Kruhliakova, O.V. Pavlova V.H. Osoblyvosti zastosuvannia teploakumuliuichykh elementiv z fazovym perekhodom v reheneratyvnykh teploobminnykakh sklovarnykh pechei // Intehrovani tekhnolohii ta enerhozberezhennia. 2022. № 1. P. 63–70.
12. Kenisarin M.M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 14 (2010). P. 955–970.

УДК 669.162.23; 669.162.231.83

О. В. Кошельник, к.техн.н., доцент, О. В. Жуков, аспирант

ПЕРСПЕКТИВНІ ТИПИ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕГЕНЕРАТИВНИХ ПОВІТРОНАГРІВАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

У роботі розглянуто проблему підвищення ефективності експлуатації систем повітропостачання доменних печей, які обладнані регенеративними теплообмінниками з нерухою вогнетривкою насадкою для нагріву гарячого дуття. Проаналізовані існуючі методи покращення показників роботи повітронагрівачів. Показано, що подальше зростання теплової ефективності регенеративних теплообмінників шляхом оптимізації параметрів роботи або заміни насадок є неможливим без збільшення габаритних параметрів. В якості перспективного заходу пропонується використання теплоакумулюючих елементів з фазовим переходом, де в якості плавкої вставки застосовуються сполуки з певною температурою плавлення, яка відповідає режимам роботи повітронагрівачів доменних печей. Вони знайшли застосування для накопичення теплоти в геліосистемах. За рахунок дії «залишкового» теплового ефекту насадки акумулюють додаткову кількість теплоти. Це дозволить збільшити теплову потужність теплообмінника та підвищити температуру нагріву гарячого дуття без змін габаритних параметрів. Умови роботи систем повітропостачання доменних печей відрізняються високим рівнем температур, що складає 1200–1350 °C, значними витратами та швидкостями гарячого та холодного теплоносіїв, їх підвищеним тиском. Тому виникає питання вибору відповідних теплоакумулюючих елементів з урахуванням їх властивостей та режимних параметрів роботи доменних печей.

Експлуатація подібних насадок виявила ряд проблем, рішення яких потребують проведення додаткових досліджень. Для цього необхідно провести моделювання квазістаціонарних теплообмінних процесів у насадковій камері регенеративних повітрянагрівачів з метою вибору хімічних сполук або їх сумішей, що відповідають умовам експлуатації систем повітропостачання доменних печей, та визначити оптимальні поєднання матеріалів насадки. Застосування даної технології дозволить отримати більш високу температуру нагріву гарячого дуття, зменшити витрату металургійного коксу або збільшити продуктивність доменної печі.

Ключові слова: доменна піч, регенеративний повітрянагрівач, теплоакumuлюючий елемент, фазовий перехід, ефективність.

А. В. Кошельник, к.техн.н., доцент, А. В. Жуков, аспірант

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТИПЫ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕГЕНЕРАТИВНЫХ ВОЗДУХОНАГРЕВАТЕЛЕЙ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

В работе рассмотрена проблема повышения эффективности эксплуатации систем воздухообогрева доменных печей, которые оборудованы регенеративными теплообменниками с неподвижной огнеупорной насадкой для нагрева горячего дутья. Проанализированы существующие методы улучшения показателей работы воздухонагревателей. Показано, что дальнейший рост тепловой эффективности регенеративных теплообменников путем оптимизации параметров работы или замены насадок является невозможным без увеличения габаритных параметров. В качестве перспективного мероприятия предлагается использование теплоаккумуляторов с фазовым переходом, где в качестве плавкой вставки применяются соединения с определенной температурой плавления, которая отвечает режимам работы воздухонагревателей доменных печей. Они нашли применение для накопления теплоты в гелиосистемах. За счет действия "остаточного" теплового эффекта насадки аккумулируют дополнительное количество теплоты. Это позволит увеличить тепловую мощность теплообменника и повысить температуру нагрева горячего дутья без изменения габаритных параметров. Условия работы систем воздухообогрева доменных печей отличаются высоким уровнем температур, который составляет 1200–1350 °С, значительными расходами и скоростями горячего и холодного теплоносителей, их повышенным давлением. Поэтому возникает вопрос выбора соответствующих теплоаккумуляторов с учетом их свойств и режимных параметров работы доменных печей. Эксплуатация подобных насадок выявила ряд проблем, решение которых требуют проведения дополнительных исследований. Для этого необходимо провести моделирование квазистационарных теплообменных процессов в насадочной камере регенеративных воздухонагревателей с целью выбора химических соединений или их смесей, которые отвечают условиям эксплуатации систем воздухообогрева доменных печей, и определить оптимальные объединения материалов насадки. Применение данной технологии позволит получить более высокую температуру нагрева горячего дутья, уменьшить расход металлургического кокса или увеличить производительность доменной печи.

Ключевые слова: доменная печь, регенеративный воздухонагреватель, теплоаккумулятор, фазовый переход, эффективность.

O. V. Koshelnik, O. V. Zhukov

PROMISING TYPES OF HEAT STORAGE ELEMENTS FOR REGENERATIVE AIR HEATERS OF BLAST FURNACES

The paper considers the problem of improving the efficiency of operation of blast furnace air supply systems, which are equipped with regenerative heat exchangers with fixed refractory nozzle for heating hot blast. The existing methods of improving the performance of air heaters are analyzed. It is shown that further growth of thermal efficiency of regenerative heat exchangers by optimization of operation parameters or replacement of nozzles is impossible without increasing the overall parameters. As a perspective measure the use of heat storage elements with phase transition is proposed, where as a fusible insert compounds with a certain melting point are used, which corresponds to the operating modes of blast furnace air heaters. They have found application for heat storage in solar systems. Due to the "residual" thermal effect, the nozzles accumulate additional heat. This will increase the heat capacity of the heat exchanger and increase the hot blast heating temperature without changing the dimensional parameters. Operating conditions of air supply systems of blast furnaces are characterized by high temperature level, which is 1200–1350 °C, significant flow rates and speeds of hot and cold coolants, their increased pressure. Therefore, there is a question of choosing appropriate heat-accumulative elements taking into account their properties and operating parameters of blast furnaces. Operation of such nozzles has revealed a number of problems, the solution of which requires additional research. For this purpose it is necessary to carry out modeling of quasi-stationary heat-exchange processes in the nozzle chamber of regenerative air heaters in order to select chemical compounds or their mixtures, which meet the operating conditions of blast furnace air supply systems, and to determine the optimal combinations of nozzle materials. Application of this technology will make it possible to obtain higher hot blast heating temperature, reduce metallurgical coke consumption or increase blast furnace productivity.

Keywords: blast furnace, regenerative air heater, heat storage element, phase transition, efficiency.

В. Є. Ведь, д.техн.н., професор, Є. В. Краснокутський, к.техн.н., доцент,
К. О. Горбунов, к.техн.н., професор, А. М. Миронов, к.техн.н., доцент,
М. В. Ільченко, к.техн.н., доцент, Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор

СТЕНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЛОКУ КАТАЛІТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ШАРОМ КАТАЛІЗАТОРА НА ПОВЕРХНІ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МЕДІАТОРІВ

Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»

Вступ

Промислові газові викиди та газові викиди автотранспорту є основними забруднювачами навколишнього середовища. Актуальним методом очищення газових викидів є каталітична конверсія. Але композиція та конструкції каталітичних нейтралізаторів вихлопних газів двигунів внутрішнього згорання потребують подальшого вдосконалення. Це пов'язано з недоліками промислових методів отримання механічно міцних і термічно стійких каталізаторів та їх носіїв для каталітичних нейтралізаторів, а також із тим, що існуючі методи розрахунку та проектування каталітичних нейтралізаторів базуються на наближених і спрощених підходах, які розглядають каталітичну конверсію з позицій хімічної кінетики або з позицій закону масообміну.

Дослідний моторний стенд

Технічні характеристики стендового двигуна ВАЗ-21081і. Двигун ВАЗ-21081і у штатному виконанні є чотиритактним, бензиновим, карбюраторним з робочим об'ємом 1100 см³, ступенем стиснення 9.0. Номінальна потужність двигуна 40 кВт при частоті обертання колінчатого валу 5600 хв⁻¹. Максимальний обертовий момент 77.9 Н·м при $n = 3400$ хв⁻¹. Як паливо використовується бензин А-95.

Експериментальні дослідження конверсії газових викидів двигуна ВАЗ-21081і було проведено на базі дослідного моторного стенду кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Моторний стенд оснащено навантажувальним пристроєм, системою подачі палива, системи випуску відпрацьованих газів із каталітичним перетворювачем, водяною та повітряною системами охолодження, органів управління та вимірювальною апаратурою. Загальний вигляд стенду із встановленим двигуном ВАЗ-21081і наведено на рис. 1.

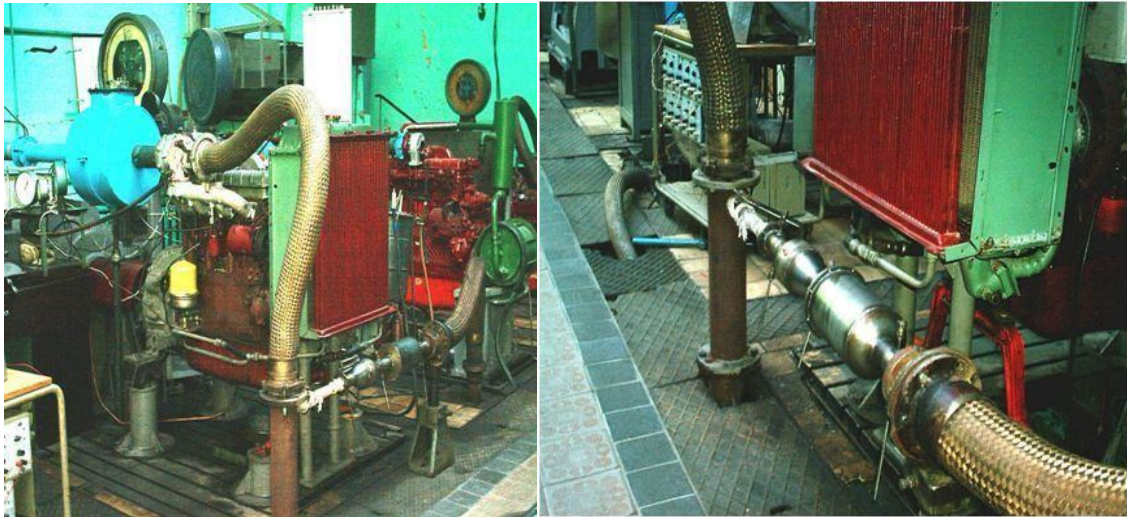


Рисунок 1 – Загальний вигляд моторного дослідного стенду кафедри «Двигуни внутрішнього згорання» НТУ «ХП»

Технічні характеристики моторного стенду. Апаратура стенду представлена наступними засобами контролю-виміральної техніки:

- датчиком фаз на шків розподільного валу у головці блоку циліндра;
- датчиком розходу повітря BOSCH;
- широкосмуговим датчиком детонації;
- датчиком швидкості;
- датчиком кисню BOSCH LHS-25;
- контролером «январь-7.2» (2111-1411020-82);
- багатоканальним цифровим пристроєм вимірювання температур відпрацьованих газів до і після нейтралізатора, оснащеним термопарами градування ТХА;
- водним U-подібним манометром для вимірювання гідравлічного опору в системі нейтралізації газів;
- динамометром для вимірювання обертового моменту на вихідному валу;
- частотоміром для вимірювання частоти обертання колінчатого валу;
- газоаналізатором «Инфракар» 5М-2.02.

Технічні характеристики промислового та розробленого каталітичних нейтралізаторів. Розроблений дослідний зразок каталітичного нейтралізатора має наступні характеристики каталітичної насадки: довжина 130 мм; діаметр 100 мм; об'єм 1 дм³; площа поверхні 3.87 м². Ескіз блоку каталітичного нейтралізатора та його загальний вигляд представлені на рис. 2 і рис. 3 відповідно. Вхідний патрубок каталітичного нейтралізатора оснащено діафрагмою-розсікачем, яка рівномірно розподіляє потік газу радіальним перерізом.

Також розроблений каталітичний перетворювач оснащено шаром теплоізоляції, розташованої між стінками двох коаксіальних циліндрів, виконаних із фольги Н80Х20. Це запобігає втратам тепла із реакційного простору нейтралізатора до навколишнього середовища як через теплопровідність корпусу, так і через теплове випромінювання, і приводить до вирівнювання теплового поля та рівномірності використання всієї поверхні каталітичного перетворювача у процесі знешкодження газових викидів.

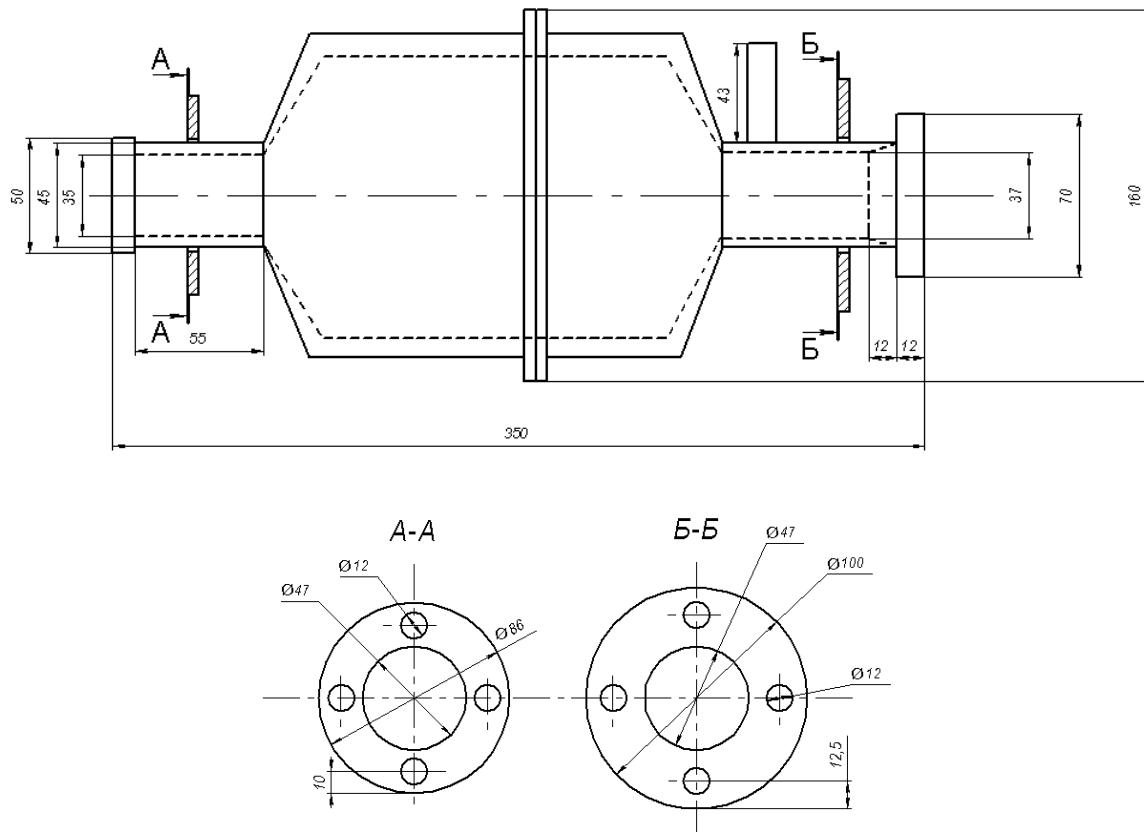


Рисунок 2 – Ескіз блоку каталітичного нейтралізатора та його фланцевих з'єднань



Рисунок 3 - Зовнішній вигляд розробленого блоку каталітичного нейтралізатора



Рисунок 4 - Зовнішній вигляд каталітичного нейтралізатора Bosal 099-886

Для оцінки експлуатаційних характеристик створеного нейтралізатора було придбано новий промисловий автомобільний каталітичний нейтралізатор Bosal 099-886 (рис. 4).

Каталітичний нейтралізатор Bosal 099-886 на відміну від розробленого каталітичного нейтралізатора має суттєві конструктивні недоліки: квадратний переріз робочого об'єму блоку, неперфорований носій каталізатора, конструкція блоку не передбачає теплоізоляцію та засобів рівномірного розподілу газового потоку перерізом нейтралізатора. Іншим недоліком, який суттєво збільшує вартість каталітичного нейтралізатора Bosal 099-886, є використання у ньому як каталізатора платино-родієвого покриття.

Квадратний переріз робочого об'єму блоку обумовлює те, що відпрацьовані гази, які входять до блоку через патрубок круглого перерізу, нерівномірно розподіляються об'ємом робочого блоку, причому найменша кількість газів надходить до кутових зон квадратного перерізу блоку. З іншого боку, саме кутові зони мають найбільшу питому поверхню щодо навколишнього середовища, завдяки чому в них спостерігається збільшений тепловідвід, зниження температури газового потоку, зменшення швидкості конверсії викидних газів та збільшення відкладень сажі на поверхні каталітичного перетворювача та його дезактивація. Все це ускладнюється відсутністю теплоізоляції каталітичного нейтралізатора Bosal 099-886.

Неперфорований носій шару каталізатора, що застосовується у каталітичному нейтралізаторі Bosal 099-886, має суттєві вади у порівнянні з розробленим металевим носієм сітчастої структури: відсутність пор унеможливорює радіальне перемішування газових викидів у поперечному напрямку каталітичної насадки, що погіршує вирівнювання поля температур у блоці нейтралізатора та зменшує ефективність використання поверхні каталізатора.

Програма та методика випробувань каталітичних нейтралізаторів

Відповідно до розробленої програми підготовки до випробувань дослідні зразки каталітичних нейтралізаторів, виготовлених у відповідності із запропонованими методиками [1–4], встановлювалися у випускний тракт газових викидів двигуна внутрішнього згорання та оснащувалися системою вимірювання температур газів, їх якісного та кількісного складу.

Основна програма проведення експериментальних досліджень передбачала дослідження ступеня очищення газових викидів для різних режимів роботи двигуна внутрішнього згорання з іскровим запаленням. Було досліджено навантажувальні характеристики ефективності очищення газових викидів для усталених режимів.

Час роботи двигуна на кожному режимі випробувань визначався тривалістю реєстрації робочих параметрів двигуна та нейтралізатора і становив не менше п'яти хвилин після досягнення їх стабільної роботи. Після завершення вимірювання відбувався перехід на наступний режим. Результати досліджень зведено до табл. 1.

Обробка результатів досліджень

Проведення експериментальних досліджень на кожному режимі роботи двигуна дозволило отримати дані, які представлено у графічній формі у вигляді залежностей початкового (до каталітичного нейтралізатора) та залишкового (після нього) вмісту

вуглеводнів та карбон (II) оксиду від потужності, що розвиває двигун при різних частотах обертання колінчатого валу.

Аналіз рис. 5–6 та рис. 9–10 показує, що збільшення навантаження на колінчастому валу приводить до збільшення вмісту як карбон (II) оксиду, так і вуглеводнів у відпрацьованих газах. Це, на перший погляд, суперечить тому факту, що збільшення навантаження супроводжується зростанням коефіцієнту надлишку повітря і, відтак, має спостерігатися зворотний процес. Проте збільшення навантаження вимагає підвищення витрат палива і повітря на одиницю часу роботи двигуна (рис. 15–16). Це приводить до зменшення часу перебування паливно-повітряної суміші у циліндрах двигуна і, відтак, до зменшення ступеня перетворення палива у карбон (IV) оксид [5, 6].

Таблиця 1 - Навантажувальні характеристики двигуна ВАЗ-21081і та відповідні їм параметри очищення газових викидів нейтралізаторами

Частота обертання колінчатого валу n , хв^{-1}	Потужність N , кВт	Коефіцієнт надлишку повітря α .	Вміст CO до нейтралізатора, об. %	Вміст CO після нейтралізатора, об. %	Вміст CH до нейтралізатора, ppm	Вміст CH після нейтралізатора, ppm
Експериментальний нейтралізатор кафедри ІТПА НТУ "Харківський Політехнічний Інститут"						
3620	28.03	1.035	1.02	0.18	164	28
3592	21.30	1.049	0.89	0.07	138	20
3598	13.93	1.019	0.75	0.02	126	20
3607	7.25	0.970	0.70	0.04	104	28
3853	0.57	0.916	0.62	0.04	48	20
2505	18.04	1.008	0.66	0.00	155	24
2490	15.01	1.009	0.56	0.00	140	30
2500	12.50	0.994	0.60	0.00	146	24
2495	5.01	0.954	0.56	0.00	122	56
2600	0.38	0.883	0.62	0.00	70	40
Bosal 099-886						
3596	27.77	1.030	0.75	0.19	182	62
3596	21.15	1.038	0.70	0.18	142	50
3603	14.27	0.994	0.70	0.11	142	48
3603	7.56	0.970	0.65	0.05	118	40
3783	0.56	0.885	0.58	0.04	64	20
2520	17.53	1.006	0.64	0.07	148	50
2527	14.99	1.018	0.54	0.05	136	50
2523	12.61	0.998	0.70	0.07	144	52
2486	4.65	0.943	0.70	0.01	140	58
2527	0.37	0.867	0.61	0.00	82	42

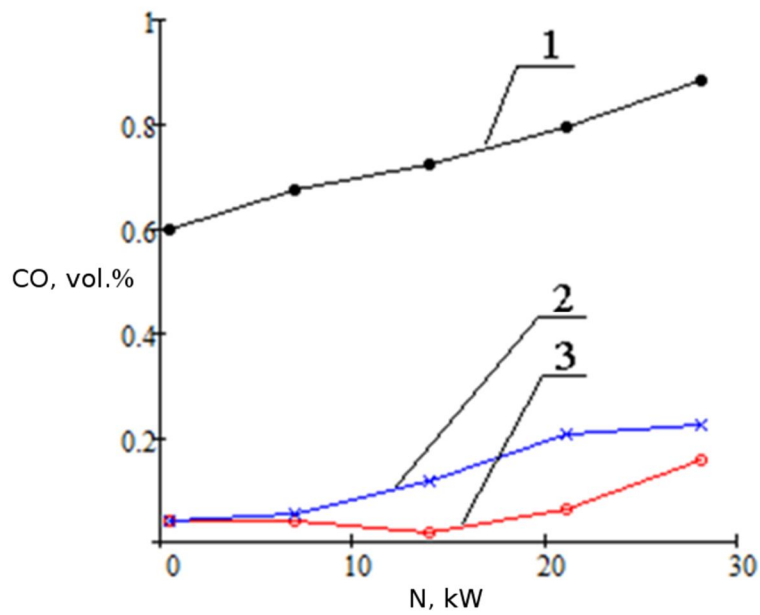


Рисунок 5 – Вміст CO, об.%, у відпрацьованих газах двигуна ВАЗ-21081і до очищення (1), після конверсії: у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) та у розробленому нейтралізаторі (3) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$

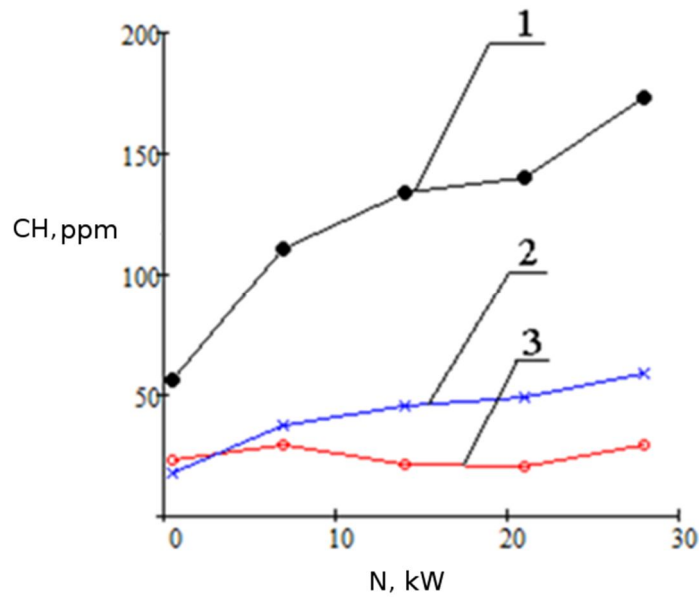


Рисунок 6 - Вміст CH, об.%, у відпрацьованих газах двигуна ВАЗ-21081і до очищення (1), після конверсії: у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) та у розробленому нейтралізаторі (3) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$

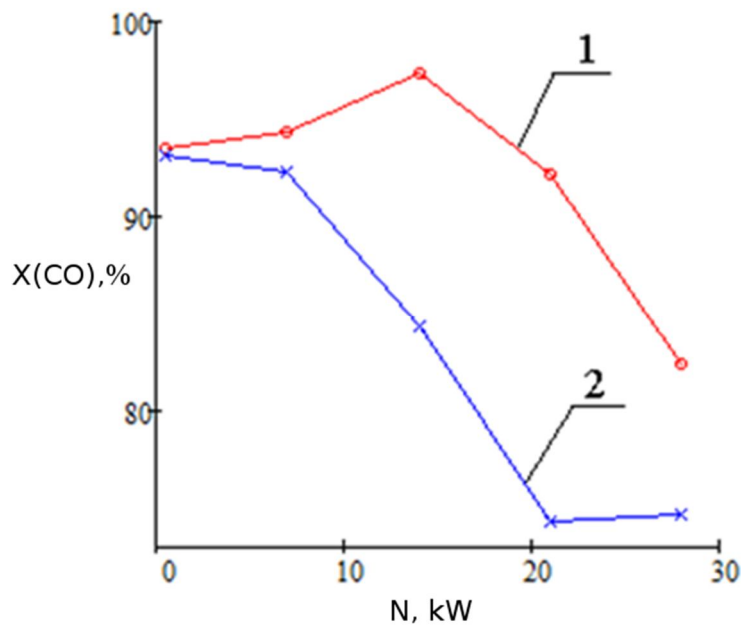


Рисунок 7 - Ступінь конверсії CO, %, після конверсії: у розробленому нейтралізаторі (1) та у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$

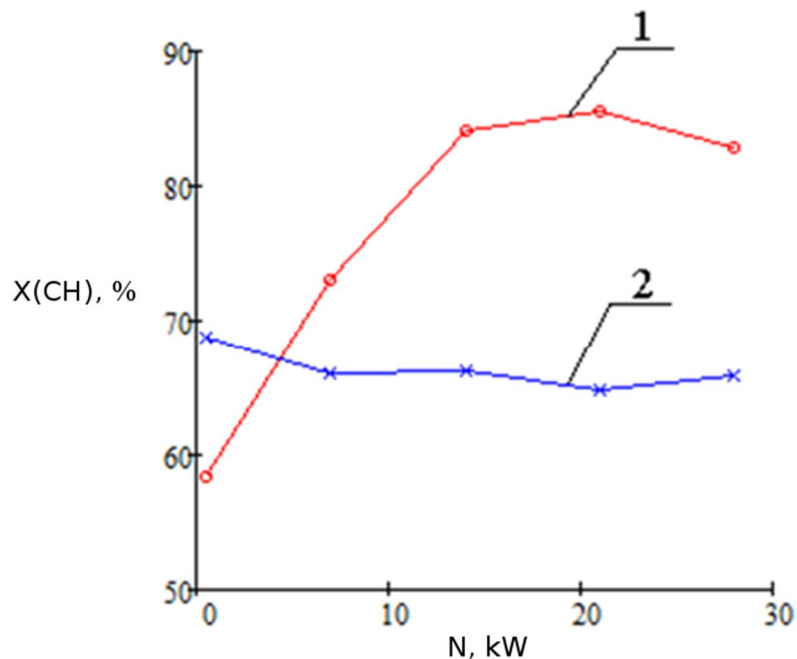


Рисунок 8 - Ступінь конверсії CH, %, після конверсії: у розробленому нейтралізаторі (1) та у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$

Підвищення витрат палива і повітря на одиницю часу роботи двигуна при збільшенні навантаження приводить до збільшення температури та швидкості потоку відпрацьованих газів (рис. 13–14) [7]. Такі умови приводять до кумулятивного

збільшення спостережуваного значення коефіцієнту масовіддачі у відповідності до запропонованої математичної моделі конверсії газових викидів [8, 9]. Все це дозволяє припустити, що збільшення навантаження має сприяти очищенню газових викидів як від карбон (II) оксиду, так і вуглеводнів. Проте отримані дані залежності ступеня перетворення карбон (II) оксиду та вуглеводнів від навантаження на двигун при частоті обертання колінчастого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$ (рис. 7–8) виявили екстремум залежності, який можна пояснити наступним чином. З одного боку підвищення навантаження на двигун приводить до збільшення швидкості потоку відпрацьованих газів і до збільшення спостережуваного коефіцієнту масовіддачі. Проте для кожного значення температури потоку відпрацьованих газів існує верхня межа спостережуваного значення поверхневих констант швидкостей перетворення карбон (II) оксиду і вуглеводнів у карбон (IV) оксид. Значення цієї межі обумовлюється питомою поверхнею контакту фаз та поверхневою концентрацією каталітично активних сполук на поверхні носія. При досягненні потоком відпрацьованих газів певної критичної швидкості спостережуване значення коефіцієнту масовіддачі стає рівним значенню спостережуваного значення поверхневої константи швидкості перетворення газових викидів у карбон (IV) оксид. Подальше підвищення швидкості потоку відпрацьованих газів приводить до переходу процесу знешкодження газових викидів із області зовнішньої дифузії у область поверхневої хімічної кінетики і, відтак, до зменшення ступеня очищення відпрацьованих газів.

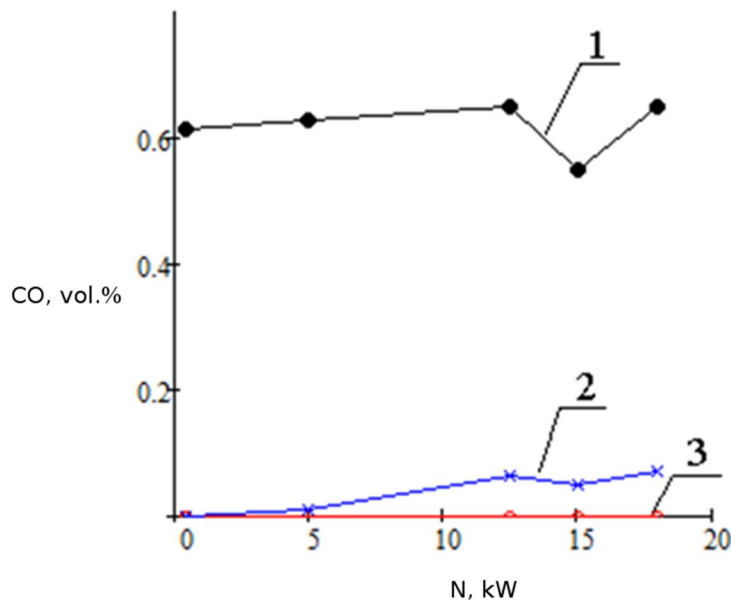


Рисунок 9 – Вміст CO, об.%, у відпрацьованих газах двигуна ВА3-21081і до очищення (1), після конверсії: у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) та у розробленому нейтралізаторі (3) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчастого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$

Екстремум залежності ступеня перетворення від потужності двигуна при частоті обертання колінчастого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$ спостерігається при потужності 15 кВт для карбон (II) оксиду та 20 кВт для вуглеводнів (рис. 7, 8). Зміщення екстремуму функції ступеня конверсії в область більш високих потужностей визначається як збільшенням геометричних розмірів блоку каталітичного перетворювача, так і вмістом каталітично активних сполук на поверхні носія.

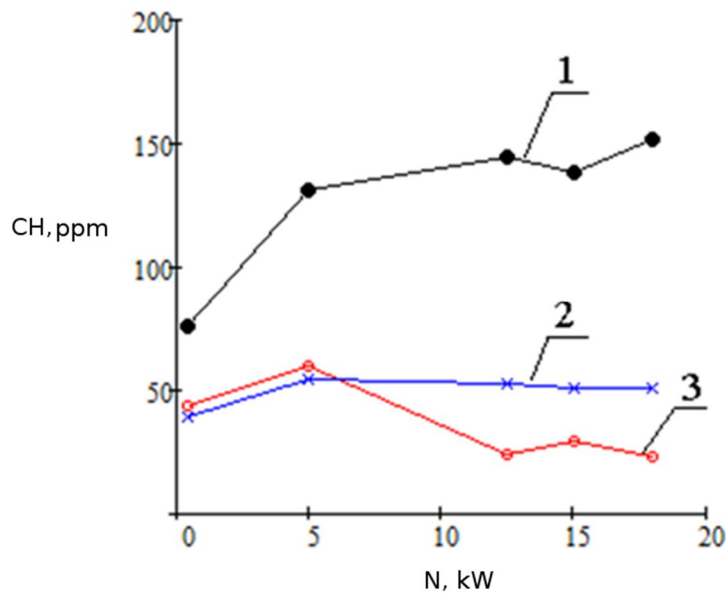


Рисунок 10 – Вміст СН, об.%, у відпрацьованих газах двигуна ВАЗ-21081і до очищення (1), після конверсії: у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) та у розробленому нейтралізаторі (3) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$

Підвищення питомої поверхні носія каталізатора для досягнення мети зміщення екстремуму в область більш високих потужностей двигуна не є доцільним, оскільки приведе до збільшення гідравлічного опору блоку каталітичного перетворювача потоку відпрацьованих газів та, як наслідок, до зменшення коефіцієнту корисної дії двигуна.

Цілкові інший характер впливу потужності двигуна на ступінь конверсії газових викидів спостерігається у випадку проведення випробувань при частоті обертання колінчастого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$. В усьому діапазоні варіювання потужності двигуна, крім точки, яка відповідає потужності 15 кВт, спостерігається ріст ступеня перетворення вуглеводнів у карбон (IV) оксид (рис. 12), що відповідає розроблені математичній моделі процесу конверсії газових викидів. «Аномальне» зменшення ступеня перетворення вуглеводнів у точці, яка відповідає потужності 15 кВт при частоті обертання колінчастого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$, пов'язано з тим, що при даній потужності двигуна спостерігається локальне підвищення коефіцієнту надлишку повітря (табл. 1) і зменшення вмісту вуглеводнів, що поступають із відпрацьованими газами у блок каталітичного перетворювача.

Також окремо слід відзначити факт стовідсоткової конверсії карбон (II) оксиду в усьому діапазоні варіювання потужності двигуна при частоті обертання колінчастого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$ навіть за умов, коли коефіцієнт надлишку повітря набуває значень, менших одиниці (рис. 11 та табл. 1). Така особливість перебігу гетерогенно-каталітичного процесу конверсії відпрацьованих газів може мати місце лише за умови, якщо константа швидкості перетворення карбон (II) оксиду на карбон (IV) оксид значно переважає константу швидкості перетворення вуглеводнів на карбон (II) оксид, що цілком збігається із отриманими даними щодо кінетичного механізму знешкодження газових викидів [10].

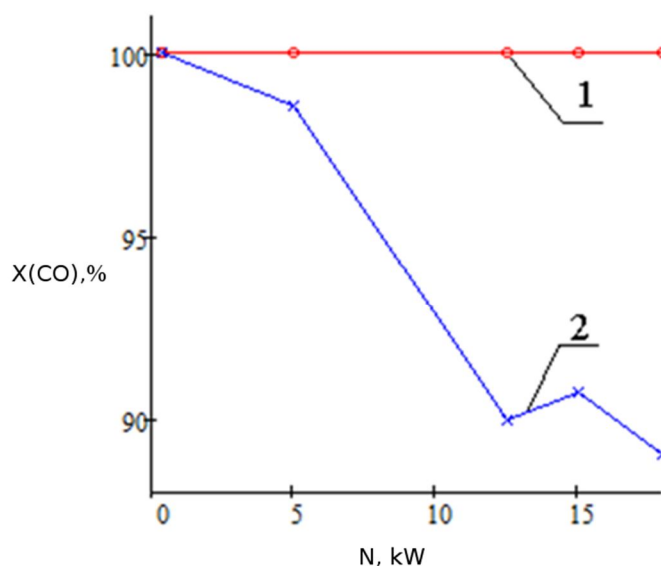


Рисунок 11 – Ступінь конверсії CO, %, після конверсії: у розробленому нейтралізаторі (1) та у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$

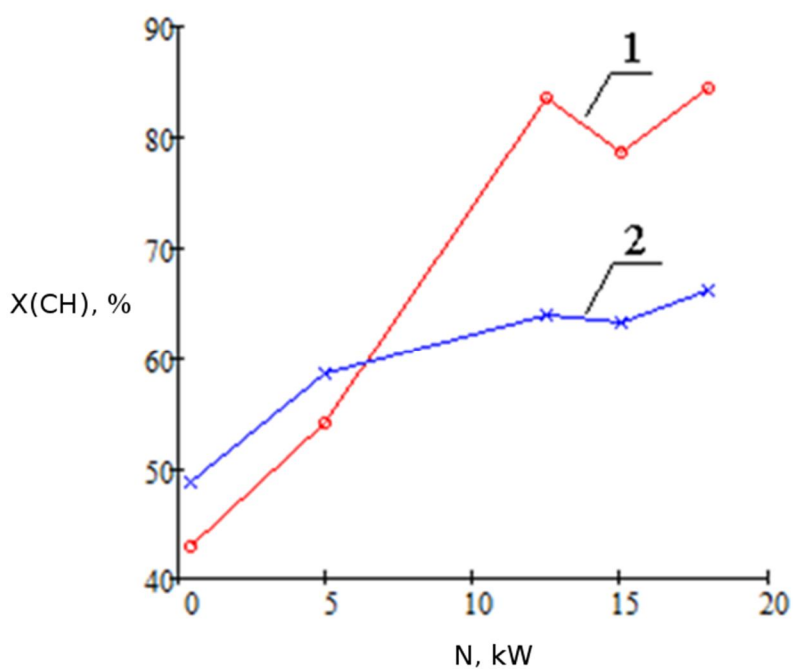


Рисунок 12 – Ступінь конверсії CH, %, після конверсії: у розробленому нейтралізаторі (1) та у нейтралізаторі Bosal 099-886 (2) в залежності від потужності двигуна при частоті обертів колінчатого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$

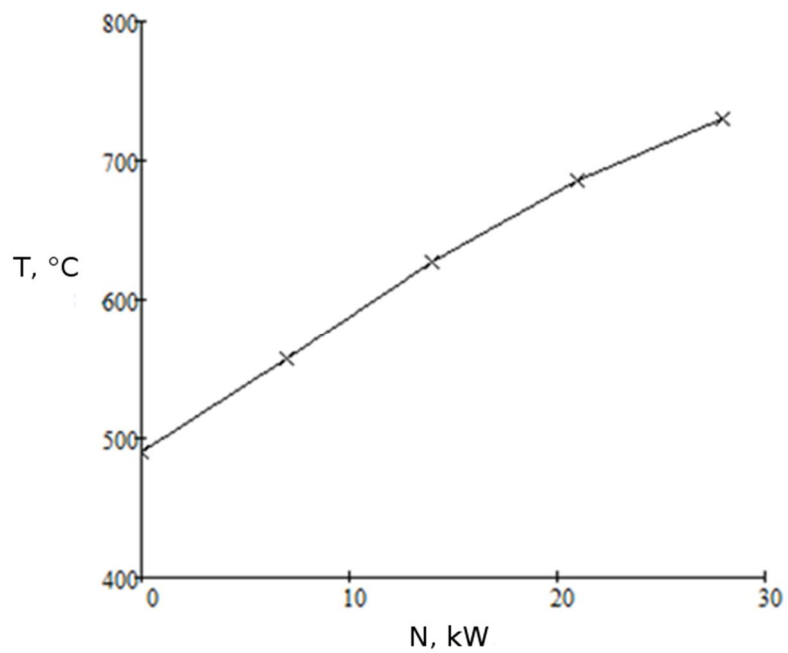


Рисунок 13 - Температура відпрацьованих газів двигуна ВАЗ-21081і при частоті обертання колінчастого валу $n = 3600 \text{ хв}^{-1}$

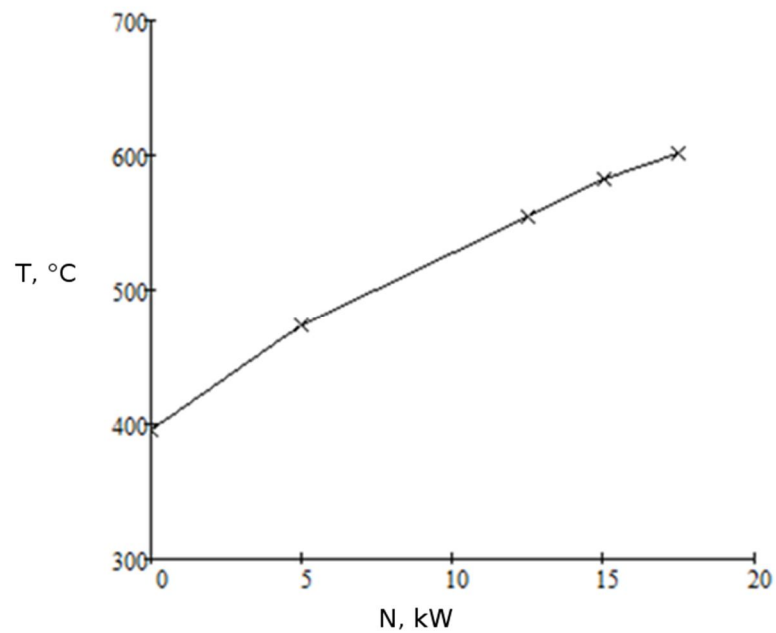


Рисунок 14 - Температура відпрацьованих газів двигуна ВАЗ-21081і при частоті обертання колінчастого валу $n = 2500 \text{ хв}^{-1}$

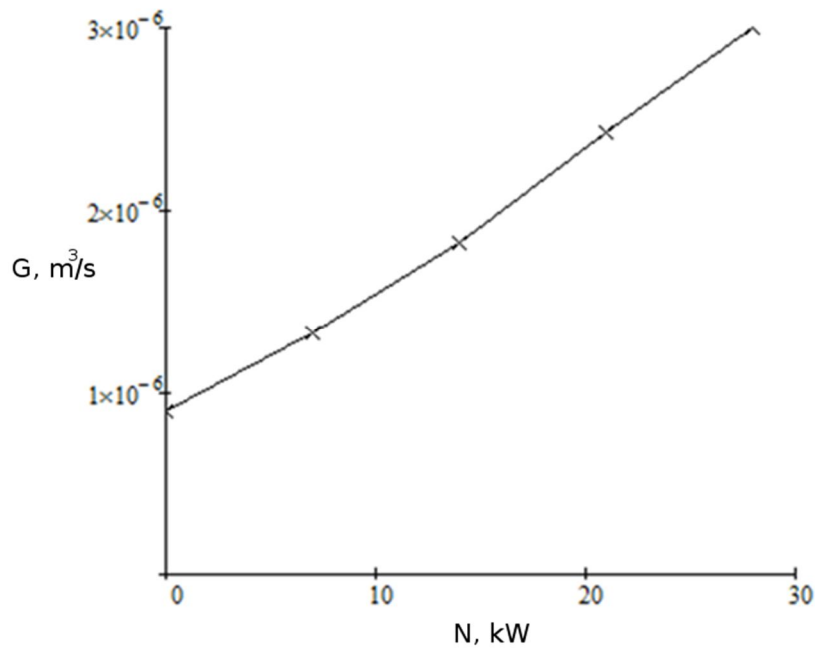


Рисунок 15 – Витрати палива на годину при частоті обертання колінчастого валу $n=3600 \text{ хв}^{-1}$ двигуна VAZ-21081i

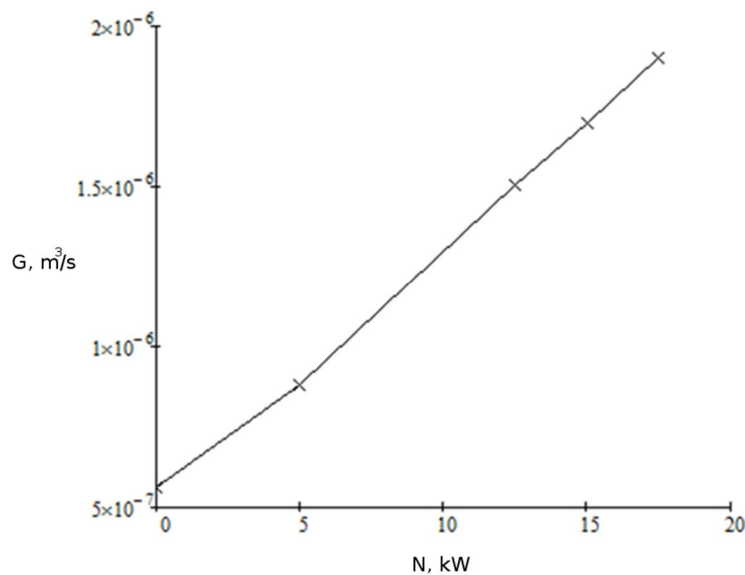


Рисунок 16 – Витрати палива на годину при частоті обертання колінчастого валу $n=2500 \text{ хв}^{-1}$ двигуна VAZ-21081i

Результати порівняльних випробувань проведених на кафедрі ДВЗ НТУ «ХП» виготовленого за розробленою методикою експериментального каталітичного нейтралізатора газових викидів і промислового автомобільного каталітичного нейтралізатора Bosal 099-886, які представлені на рис. 5–12, свідчать про значно більший ступінь очищення газових викидів експериментальним каталітичним нейтралізатором як для вуглеводнів, так і для карбон (II) оксиду, у всьому діапазоні досліджених робочих режимів двигуна VAZ-21081i.

Раніше нами було показано ефективність каталітичного нейтралізатора, створеного за розробленою нами технологією [11] для нейтралізації газових викидів сміттєпереробного комплексу [12].

Висновки

Запропонована технологія створення каталітичного нейтралізатора може бути використана не тільки для очищення вихлопних газів двигунів внутрішнього згоряння, але й для відпрацьованих газів теплоенергетичних установок і очисних споруд.

Проведено порівняльні випробування нейтралізації вихлопних газів двигуна ВАЗ-21081 і оксиду вуглецю (II) і вуглеводнів для розробленого каталітичного нейтралізатора та промислового каталітичного нейтралізатора Bosal 099-886.

Доведено значно вищу ефективність розробленого каталітичного нейтралізатора вихлопних газів оксиду вуглецю (II) і вуглеводнів порівняно з промисловим аналогом Bosal 099-886.

Показано, що встановлення розробленого каталітичного нейтралізатора у випускний тракт двигуна внутрішнього згоряння не впливає на роботу двигуна ВАЗ-21081.

Література

1. Krasnokutskiy E., Ved V., Suigenbayeva A., Saipov A., Mussabekov A., Ponomarenko H., Ved H., 2019, Catalyst Coatings Carriers Based on Boron-Silicon Glass Crystalline Compositions, Chemical Engineering Transactions, 76, 841–846. DOI:10.3303/CET1976141.
2. Krasnokutskiy E.V., Makhanov B.B., Ved' V.E., Satayev M.I., Ponomarenko A.V., Saipov A.A., 2016, Universal multi-functional secondary catalyst carriers for purification of gas emission of thermal power equipments, Chemical Engineering Transactions, 52, 277–282 DOI:10.3303/CET1652047.
3. Krasnokutskiy E.V., Ved V.E., Tovazhnyanskyy L.L., Ved H.V., 2017, Catalyst coatings carriers based on aluminumsilicon glass crystalline compositions, Chemical Engineering Transactions, 61, 397–402 DOI:10.3303/CET1761064.
4. Krasnokutskiy Ye., Ved V., Kuznetsova M., 2015. Modelling of Effective Thickness of the Catalyst Support Porous Layer. CAPE Forum, 2015. Computer Aided Process Engineering. Book of Abstracts, 27–29 April 2015. The University of Paderborn. Paderborn, 71.
5. Абрамчук Ф.І., Гутаревич Ю.Ф., Долганов К.Є., Тимченко І.І. (2007) Автомобільні двигуни. Київ. 476 р.
6. Канило П.М. (2013) Автотранспорт. Топливно-екологічні проблеми і перспективи: Харків. 272 с.
7. Корогодский В.А., Обозный С.В., Степанко В.Г. (2005) Оценка показателей рабочих процессов двигателя с искровым зажиганием и непосредственным впрыскиванием углеводородных топлив различного состава. Двигатели внутреннего сгорания. № 1: С. 21–25.
8. Товажнянский Л.Л., Краснокутский Е.В., Ведь В.Е. (2012) Кинетика процесса конверсии вредных газовых выбросов двигателей внутреннего сгорания. Математические методы в технике и технологиях ММТТ-25. Сборник трудов. Т.2: С. 135–138.

9. Eugeny V. Krasnokutskii, Leonid L. Tovazhnyanskyy, Valeriy E. Ved', Vadim A. Koshchii (2012). Modeling of Conversion Process of Harmful Exhaust Gases of Internal Combustion Engines. Computer Aided Process Engineering. Book of Abstracts: P. 36.

10. Krasnokutskii E.V., Ved V.E. (2013) Substantiating Reaction Mechanism of Thermocatalytic Benzene Conversion. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol. 47. № 1: PP. 60–65. DOI: 10.1134/S004057951301003X.

11. Ведь В.Е., Краснокутский Е.В. (2010). Перспективы создания каталитических преобразователей на металловолоконистых носителях. Сотрудничество для решения проблемы отходов: С. 79–81.

12. Tovazhnyanskyy L.L., Ved' V.E., Koshchii V.A., Rovenskii A.I., Meshalkin V.P., Krasnokutskii E.V. (2011) Effectiveness of Operation of Sewerage System of Mobile Complex of Thermocatalytic Waste Treatment. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol. 45. №. 6: PP. 838–841. DOI: 10.1134/S0040579511060169.

Bibliography (transliterated)

1. Krasnokutskiy E., Ved V., Suigenbayeva A., Saipov A., Mussabekov A., Ponomarenko H., Ved H., 2019, Catalyst Coatings Carriers Based on Boron-Silicon Glass Crystalline Compositions, Chemical Engineering Transactions, 76, 841–846. DOI:10.3303/CET1976141.

2. Krasnokutskiy E.V., Makhanov B.B., Ved' V.E., Satayev M.I., Ponomarenko A.V., Saipov A.A., 2016, Universal multi-functional secondary catalyst carriers for purification of gas emission of thermal power equipments, Chemical Engineering Transactions, 52, 277–282 DOI:10.3303/CET1652047.

3. Krasnokutskiy E.V., Ved V.E., Tovazhnyanskyy L.L., Ved H.V., 2017, Catalyst coatings carriers based on aluminiumsilicon glass crystalline compositions, Chemical Engineering Transactions, 61, 397–402 DOI:10.3303/CET1761064.

4. Krasnokutskiy Ye., Ved V., Kuznetsova M., 2015. Modelling of Effective Thickness of the Catalyst Support Porous Layer. CAPE Forum, 2015. Computer Aided Process Engineering. Book of Abstracts, 27–29 April 2015. The University of Paderborn. Paderborn, 71.

5. Abramchuk F.I., Gutarevich Yu.F., Dolganov K.E., Timchenko I.I. (2007) Avtomobilni dviguni. Kiyiv. 476 p.

6. Kanilo P.M. (2013) Avtotransport. Toplivno-ekologicheskie problemy i perspektivy: Harkov. 272 p.

7. Korogodskiy V.A., Oboznyi S.V., Stepanko V.G. (2005) Otsenka pokazateley rabochih protsessov dvigatelya s iskrovyim zazhiganiem i neposredstvennyim vpryiskivaniem uglevodородnyih topliv razlichnogo sostava. Dvigateli vnutrennego sgoraniya. # 1: P. 21–25.

8. Tovazhnyanskiy L.L., Krasnokutskiy E.V., Ved V.E. (2012) Kinetika protsessa konversii vrednyih gazovyih vyibrosov dvigateley vnutrennego sgoraniya. Matematicheskie metody v tehnikе i tehnologiyah MMTT-25. Sbornik trudov. T.2: P. 135–138.

9. Eugeny V. Krasnokutskii, Leonid L. Tovazhnyanskyy, Valeriy E. Ved', Vadim A. Koshchii (2012). Modeling of Conversion Process of Harmful Exhaust Gases of Internal Combustion Engines. Computer Aided Process Engineering. Book of Abstracts: P. 36.

10. Krasnokutskii E.V., Ved V.E. (2013) Substantiating Reaction Mechanism of Thermocatalytic Benzene Conversion. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol. 47. # 1: PP. 60–65. DOI: 10.1134/S004057951301003X.

11. Ved V.E., Krasnokutskiy E.V. (2010). Perspektivnyi sozdaniya kataliticheskikh preobrazovateley na metallovoloknistyih nositelyah. Sotrudnichestvo dlya resheniya problemyi othodov: P. 79–81.

12. Tovazhnyanskyy L.L., Ved' V.E., Koshchii V.A., Rovenskii A.I., Meshalkin V.P., Krasnokutskii E.V. (2011) Effectiveness of Operation of Sewerage System of Mobile Complex of Thermocatalytic Waste Treatment. Theoretical Foundations of Chemical Engineering. Vol. 45. №. 6: PP. 838–841. DOI: 10.1134/S0040579511060169.

УДК 544.4:66.021.3

В. Є. Ведь, д.техн.н., професор, Є. В. Краснокутський, к.техн.н., доцент,
К. О. Горбунов, к.техн.н., професор, А. М. Миронов, к.техн.н., доцент,
М. В. Ільченко, к.техн.н., доцент, Ю. А. Селіхов, к.техн.н., професор

СТЕНДОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ БЛОКУ КАТАЛІТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІЗ ШАРОМ КАТАЛІЗАТОРА НА ПОВЕРХНІ СКЛОКРИСТАЛІЧНИХ МЕДІАТОРІВ

Стаття розглядає проблеми промислових газових викидів та викидів автотранспорту як основних джерел забруднення навколишнього середовища. Увага у статті акцентується на важливості каталітичної конверсії як сучасного методу очищення газових викидів, але вказується на потребу у подальшому удосконаленні конструкцій каталітичних нейтралізаторів. Автори вказують на недоліки у виготовленні механічно міцних і термічно стійких каталізаторів та їхніх носіїв, а також на обмеженості існуючих методів розрахунку та проектування. У статті експериментально показано підходи до збільшення ефективності каталітичної конверсії газових викидів, а також наведено порівняльний аналіз ефективності розробленого каталітичного перетворювача та його промислового аналога.

Стаття презентує експериментальні дослідження на моторному стенді з використанням двигуна ВАЗ-21081і, подає технічні характеристики та інструменти контрольно-вимірювальної техніки. Розглядається розроблений каталітичний нейтралізатор, його конструкція та характеристики. Ключова увага у статті приділяється програмі та методиці випробувань каталітичних нейтралізаторів та обробці результатів: включаючи систему вимірювання температур, швидкості та складу вихідних газів.

У експериментальних дослідженнях аналізується вплив навантаження на двигун внутрішнього згорання на температуру та швидкість потоку відпрацьованих газів. Аналіз результатів експериментів показує, що збільшення навантаження на двигун призводить до підвищення температури та швидкості потоку відпрацьованих газів. Авторами використовується математичну модель конверсії газових викидів, розроблена у попередніх роботах, та експериментально доводиться, що збільшення навантаження на двигун сприяє ефективнішому очищенню газів від карбон (II) оксиду та вуглеводнів. Виявлено екстремум залежності ступеня конверсії карбон (II) оксиду та вуглеводнів від потужності двигуна, де збільшення навантаження призводить до

зменшення ступеня очищення газів. Порівняльні випробування свідчать про високу ефективність експериментального каталітичного нейтралізатора порівняно з промисловим аналогом.

Ключові слова: газові викиди, каталітична конверсія, хімічна кінетика, масовіддача, каталітичний перетворювач, конверсію карбон (II) оксиду, конверсія вуглеводнів.

В. Е. Ведь, д.техн.н., профессор, Е. В. Краснокутский, к.техн.н., доцент,
К. А. Горбунов, к.техн.н., профессор, А. Н. Миронов, к.техн.н., доцент,
М. В., Ильченко к.техн.н., доцент, Ю. А. Селихов, к.техн.н., профессор

СТЕНДОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ БЛОКА КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СО СЛОЕМ КАТАЛИЗАТОРА НА ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МЕДИАТОРОВ

Статья рассматривает проблемы промышленных газовых и автотранспортных выбросов как основных источников загрязнения окружающей среды. Внимание в статье акцентируется на важности каталитической конверсии как современного метода очистки газовых выбросов, но указывается на необходимость дальнейшего усовершенствования конструкций каталитических нейтралізаторов. Авторы указывают на недостатки в изготовлении механически прочных и термически устойчивых катализаторов и их носителей, а также ограниченности существующих методов расчета и проектирования. В статье экспериментально показаны подходы к увеличению эффективности каталитической конверсии газовых выбросов, а также представлен сравнительный анализ эффективности разработанного каталитического преобразователя и его промышленного аналога.

Статья представляет экспериментальные исследования на моторном стенде с использованием двигателя ВАЗ-21081і, представляет технические характеристики и инструменты контрольно-измерительной техники. Рассматривается разработанный каталитический нейтралізатор, его конструкция и свойства. Ключевое внимание в статье уделяется программе и методике испытаний каталитических нейтралізаторов и обработке результатов: включая систему измерения тестатуры, скорости и состава исходных газов.

В экспериментальных исследованиях анализируется влияние нагрузки на двигатель внутреннего сгорания на температуру и скорость потока отходящего газа. Анализ результатов экспериментов показывает, что увеличение нагрузки на двигатель приводит к повышению температуры и скорости потока дымовых газов. Авторами используется математическая модель конверсии газовых выбросов, разработанная в предыдущих работах, и экспериментально доказывается, что увеличение нагрузки на двигатель способствует более эффективной очистке газов от карбон (II) оксида и углеводородов. Выявлен экстремум зависимости степени конверсии карбон (II) оксида и углеводородов от мощности двигателя, где увеличение нагрузки приводит к уменьшению степени очистки газов. Сравнительные испытания свидетельствуют о высокой эффективности экспериментального каталитического нейтралізатора по

сравнению с промышленным аналогом.

Ключевые слова: газовые выбросы, каталитическая конверсия, химическая кинетика, массоотдача, каталитический преобразователь, конверсию карбон (II) оксида, конверсия углеводородов.

V. E. Ved, E. V. Krasnokutskii, K. O. Gorbunov, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko,
Yu. A. Selikhov

BENCH TESTS OF A CATALYTIC CONVERTER UNIT WITH A CATALYST LAYER ON THE SURFACE OF GLASS-CRYSTAL MEDIATORS

The article examines the problems of industrial gas emissions and vehicle emissions as the main sources of environmental pollution. The article focuses on the importance of catalytic conversion as a modern method of cleaning gas emissions, but points to the need for further improvement of catalytic converter designs. The authors point out the shortcomings in the production of mechanically strong and thermally stable catalysts and their carriers, as well as the limitations of existing calculation and design methods. The article experimentally shows approaches to increasing the efficiency of catalytic conversion of gas emissions, and also provides a comparative analysis of the efficiency of the developed catalytic converter and its industrial analogue.

The article presents experimental research on the motor stand using the VAZ-21081i engine, presents technical characteristics and tools of control and measurement equipment. The developed catalytic converter, its design and characteristics are considered. Key attention in the article is given to the program and methodology of testing catalytic converters and processing the results: including the system for measuring temperatures, velocity and composition of the outgoing gases.

In experimental studies, the influence of the load on the internal combustion engine on the temperature and speed of the flow of exhaust gases is analyzed. The analysis of the results of the experiments shows that an increase in the load on the engine leads to an increase in the temperature and speed of the flow of exhaust gases. The authors use the mathematical model of the conversion of gas emissions, developed in previous works, and experimentally prove that increasing the load on the engine contributes to more efficient purification of gases from carbon (II) oxide and hydrocarbons. The extremum of the dependence of the degree of conversion of carbon (II) oxide and hydrocarbons on engine power was revealed, where an increase in load leads to a decrease in the degree of gas purification. Comparative tests show the high efficiency of the experimental catalytic converter compared to the industrial analogue.

Keywords: gas emissions, catalytic conversion, chemical kinetics, mass transfer, catalytic converter, carbon (II) oxide conversion, hydrocarbon conversion.

О. Б. Аніпко¹, д.техн.н., професор, Д. С. Баулін², к.техн.н., с.н.с.

ДОЦІЛЬНІ ТЕРМІНИ РЕГЕНЕРАЦІЇ НІТРОЦЕЛЮЛОЗНИХ ПОРОХОВИХ ЗАРЯДІВ ТРИВАЛИХ ТЕРМІНІВ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРИВАЛІСТЬ ПІСЛЯРЕГЕНЕРАЦІЙНОГО ПЕРІОДУ ЇХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

¹Харківський Національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

²Національна академія Національної гвардії України, Харків

Ключові слова: пороховий заряд, нітроцелюлозний порох, балістичні характеристики, геронтологічні зміни, регенерація зарядів, післярегенераційний період.

Постановка проблеми та аналіз публікацій

В основі зарядів до ствольних систем (артилерійське та стрілецьке озброєння) лежать піроксилінові порохи, виготовлені на основі нітроклітковини, яка, у свою чергу, є хімічно нестійкою сполукою і вступаючи в реакцію з іонами (ОН), що знаходяться в повітрі, утворює азотну та азотисту кислоти за механізмом автокаталітичної реакції. Таким чином, фізико-хімічні властивості порохів безперервно змінюються з часом. Цей процес посилюється тим фактом, що з часом втрачаючи щільність, енергетичну цінність як паливо, порохи набувають бризантних властивостей і ймовірність мимовільного вибуху безперервно зростає.

Проведені дослідження [1–5] показали, що терміни зберігання боєприпасів в Україні становлять набагато більш 30 років і збільшуються з кожним роком. Встановлено [6–8], що вже після 25 років зберігання через зміни енергетичних характеристик порохового заряду відбуваються зміни балістичних характеристик зброї, які неможливо відкоригувати введенням поправок в установки стрільби. Виникає питання доцільності застосування таких боєприпасів, як у точності виконання вогневих завдань та експлуатації озброєння загалом, так і у сфері безпеки особового складу.

Виникає комплексна проблема оцінки стану зарядів, яка пов'язана з відсутністю у державі надійної системи моніторингу стану порохових зарядів боєприпасів, розроблення технології їх регенерації, утилізації та можливості застосування за призначенням [3]. Перша з наведених проблем є ключовою, оскільки саме від її результатів залежить подальше продовження життєвого циклу боєприпасів.

Одним із завдань, пов'язаних із проблемою експлуатації боєприпасів, є можливість прогнозування зміни їх властивостей на різних етапах зберігання.

Найважливішим показником зміни властивостей порохів є зниження початкової швидкості снаряда. За цим показником оцінюється зміна балістичних показників озброєння.

Аналіз літературних джерел свідчить, що останнім часом з'явилися публікації [1, 2, 5, 7], пов'язані з обґрунтуванням термінів експлуатації боєприпасів. Проведені експериментальні дослідження [9–11] підтверджують, що при тривалому зберіганні спостерігаються зміни у хімічному складі нітроцелюлозних порохів. Зміна кольору порохових елементів підтверджує хімічні реакції, що відбуваються, з поступовим зменшенням їх маси [7].

Однак невідомо, як показник початкової швидкості снаряда реагує на зміну маси порохового заряду. Також немає обґрунтованого прогнозу змін енергетичних характе-

ристик порохових зарядів та балістичних характеристик озброєння. У [12, 13] показана можливість проведення регенерації порохових зарядів та відновлення їх властивостей шляхом обробки розчином перекису водню. Однак не показано часових рамок проведення регенерації порохових зарядів для отримання найкращого ефекту.

У доступних джерелах [14–17], присвячених експлуатації боєприпасів, є дані про вплив характеристик порохів на балістичні характеристики та матеріальну частину озброєння. Однак даних про регенерацію та відновлення властивостей порохів у літературі не виявлено. Очевидно, це пов'язано з тим, що не допускалося тривале зберігання боєприпасів шляхом їхньої планової ротації у визначені терміни. Але, навіть у збройних силах розвинених країн (США, Німеччина, Великобританія, Франція) є досить великі запаси боєприпасів [20–22], які вимагають певних дій, пов'язаних з їхньою утилізацією чи регенерацією, оскільки терміни їх зберігання дуже великі.

У зв'язку з цим **метою статті** є визначення найбільш доцільних термінів відновлення властивостей нітроцелюлозних порохів тривалих термінів зберігання для отримання найкращого ефекту.

Виклад основного матеріалу

У літературних джерелах [12, 13, 18] є дані про можливість проведення регенерації порохових зарядів на основі піроксиліну для відновлення їх балістичних та енергетичних характеристик. За оцінками [13], регенерація порохових зарядів дає збільшення маси заряду $\Delta\omega \approx 3\%$.

З формули [13]

$$\frac{\Delta\omega}{\omega_T} = k \frac{\Delta V_0}{V_{0T}}, \quad (1)$$

де $\Delta\omega$ – зміна маси заряду; ω_T – маса заряду таблична; k – коефіцієнт пропорційності; ΔV_0 – зміна початкової швидкості; V_{0T} – початкова швидкість снаряда таблична, видно, що збільшення маси заряду впливає на збільшення початкової швидкості снаряда, причому не лінійно, а через коефіцієнт k .

На рис. 1 наведено графік зміни величини початкової швидкості снаряда в залежності від термінів експлуатації боєприпасів. Відповідно до [1, 2], величина початкової швидкості зменшується з часом за певною залежністю.

На рис. 1 показано періоди експлуатації боєприпасів: гарантійний (I) та період деградації порохового заряду (II), протягом якого балістичні та енергетичні характеристики знаходяться в межах норми.

Зменшення початкової швидкості на величину 5 % від табличних даних знаходиться в діапазоні можливого застосування боєприпасів, коли зміна V_0 коригується прицільними пристосуваннями і установками для стрільби [8, 9, 11].

Можна уявити період до точки **A** як гарантійний, у якому балістичні характеристики боєприпасів перебувають у встановлених межах [1, 2, 14].

Період після точки **A** – період доцільних термінів регенерації порохових зарядів. Саме в цьому періоді найбільше доцільно проводити відновлення характеристик нітроцелюлозних порохів.

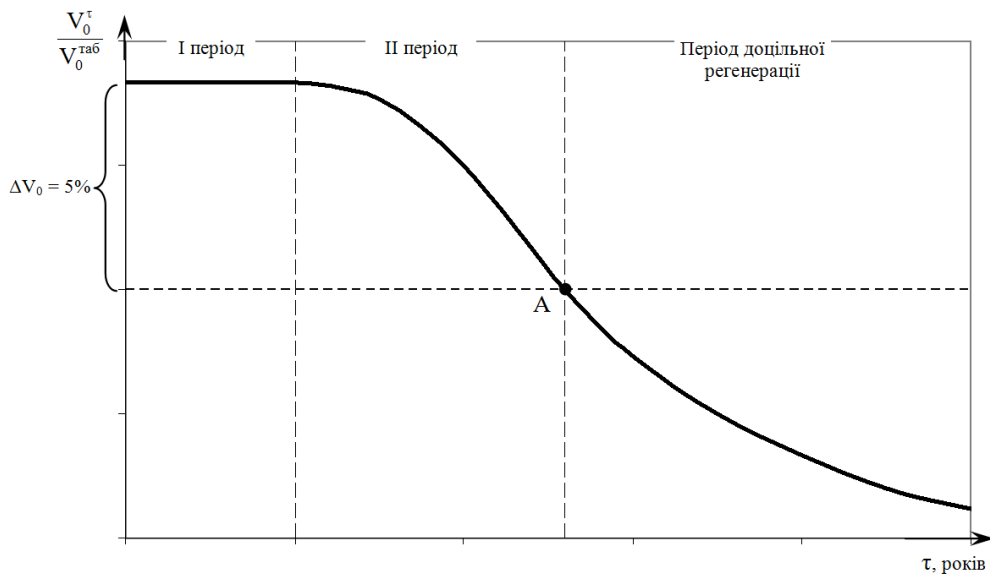


Рисунок 1 – Залежність зміни величини початкової швидкості снаряда від часу експлуатації боєприпасу

Як зазначалося вище, у процесі регенерації маса порохового заряду збільшується на 3 % шляхом насичення нітроцелюлози воднем. На скільки збільшиться початкова швидкість снаряда однозначно відповісти неможливо, оскільки коефіцієнт k залежить від умов виробництва та експлуатації порохового заряду і буде різним для кожної партії боєприпасів.

Але відомо [13, 18], що ефект збільшення маси заряду, а звідси і збільшення початкової швидкості, існує.

Звідси, під час проведення регенерації порохового заряду під час доцільної регенерації у певному терміні експлуатації t_1 (точка В), отримаємо збільшення початкової швидкості (рис. 2).

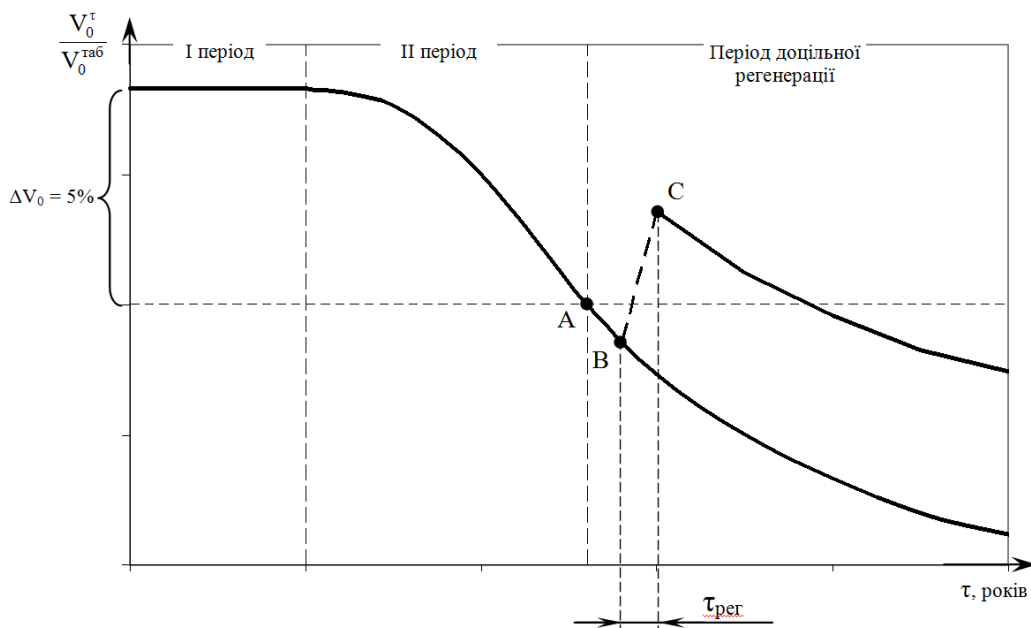


Рисунок 2 – Зміни величини початкової швидкості снаряда під час проведення регенерації порохового заряду

Процес регенерації займає певний час ($\tau_{\text{рег}}$), і показник властивості порохового заряду (V_0) переміститься з точки В у точку С. Як видно, значення величини початкової швидкості буде відповідати рівню гарантійного періоду.

Далі, процес зменшення початкової швидкості проходить за тим самим законом $V_0(\tau)$, але з точки С.

На рис. 3 показаний новий період експлуатації порохового заряду – період після регенерації.

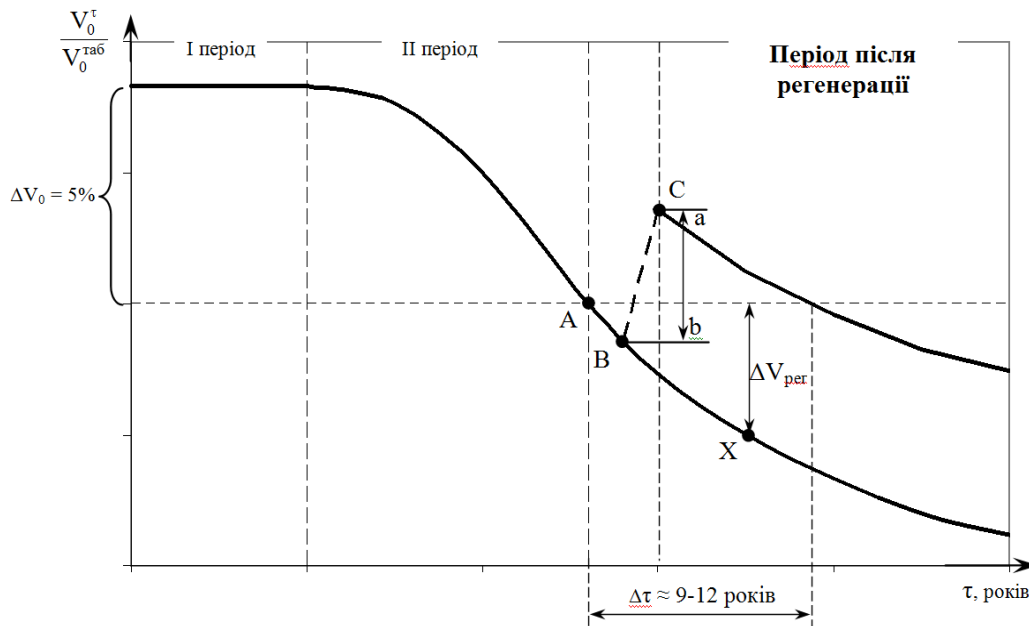


Рисунок 3 – Післярегенерацийний період експлуатації порохового заряду

Також на рис. 3 представлений ефект від регенерації ($\Delta V_{\text{рег}}$) у вигляді відрізка a-b.

Якщо величину $\Delta V_{\text{рег}}$ (відрізок a-b) перемістити візуально на залежність зміни початкової швидкості, то отримаємо точку X, яка показує термін експлуатації боєприпасів, після якого регенерація не доцільна, оскільки її ефект не відновить характеристики порохового заряду до рівня 5 %-го зниження початкової швидкості і, відповідно, буде неефективною.

На рис. 4 представлений випадок регенерації порохового заряду в момент погіршення його характеристик на 5 % (з точки А), тобто на межі експлуатації. Саме в цей момент (А-С) пропонується проведення регенерації, оскільки в цей період часу передбачається отримати максимальний ефект.

Але в момент, коли втрата властивостей порохового заряду оцінюється у 5 %, інтерес викликає можливість технологічно довести ефект від регенерації також до 5 % (рис. 4).

Це відповідає відновленню властивостей на рівень гарантійної експлуатації (А-С'). Подальша експлуатація порохових зарядів графічно представлена з точки С' і може бути продовжена вдвічі.

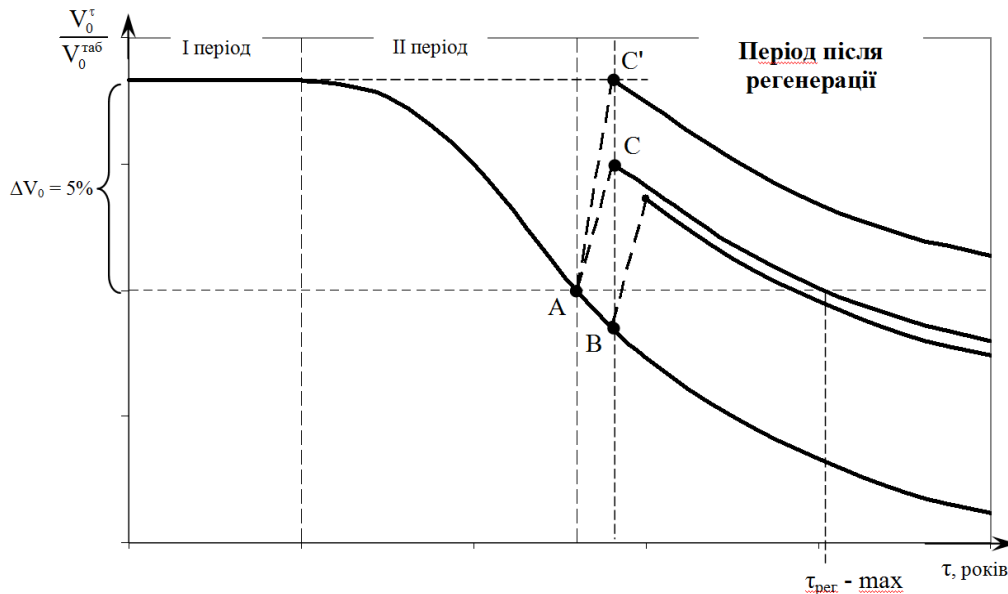


Рисунок 4 – Максимальний ефект регенерації порохового заряду

Висновки. Проблема нітроцелюлозних порохів тривалих термінів зберігання є комплексною і полягає в невідповідності стану розвитку існуючої теоретико-експериментальної бази визначення та підвищення їх енергетичних характеристик.

Показано принципову можливість відновлення балістичних та енергетичних характеристик нітроцелюлозних порохів шляхом обробки їх перекисом водню.

На підставі проведених досліджень, використовуючи модель експлуатації боєприпасів, у життєвому циклі порохових зарядів вперше запропоновано застосувати період після регенерації, що дає змогу визначати час доцільного відновлення характеристик зарядів. Він трохи коливатиметься для різних партій порохів, але, з достатньою ймовірністю, його тимчасові рамки можна визначити з 25–27 років.

Література

1. Аніпко О.Б., Баулін Д.С., Горелишев С.А. Геронтологічні властивості порохових зарядів боєприпасів та їх вплив на показники живучості стрілецької зброї: Монографія. Харків: Вид-во Національної академії Національної гвардії України, 2019. 119 с.
2. Аніпко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительных сроков хранения. Монография. Х.: АВВ МВД Украины, 2010 – 128 с.
3. Аніпко 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.
4. 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.
5. 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.

6. Баулін Д.С. Нитроцелюлозні порохові заряди тривалих термінів експлуатації: проблемні задачі та їх можливі рішення // Інтегровані технології та енергозбереження. 2021. №4. С. 33–45.
7. Анипко О.Б., Хайков В.Л. Цветометрия пороховых элементов метательных зарядов артиллерийских боеприпасов // Артиллерийское и стрелковое вооружение. 2011. №1. С. 28–35.
8. 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.
9. 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.
10. Аніпко О.Б., Баулін Д.С. Аналітична гіпотеза для обґрунтування принципової можливості регенерації нітроцелюлозних порохів після тривалого зберігання перекисом водню // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №4. С. 65–72.
11. Черкашин А.Д. Проверка достоверности прогноза и коррекция зависимости изменения начальной скорости пули 9 мм пистолетного патрона ПМ // Системи озброєння і військова техніка. 2010. № 3. С. 90–92.
12. Анипко О.Б. Результаты экспериментального исследования воздействия перекиси водорода на нитроцеллюлозные высокомолекулярные соединения // Інтегровані технології та енергозбереження. 2014. № 2. С. 50–55.
13. Oleg Anipko, Dmitro Baulin, Stanislav Horielyshev, Igor Boikov, Yurii Babkov, Oleksandr Oleksenko, Halyna Misiuk, Volodymyr Kutsenko, Mykhailo Ivanets, Valerii Voinov Study Of The Nitrocellulose Gunpowder Regeneration Process Using Hydrogen Peroxide. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2023, № 5(43), С. 3–13.
14. Анипко О.Б., Муленко А.О., Баулин Д.С. Экспериментальное исследование износа ствола 5,45 мм автомата Калашникова АК-74 при стрельбе боеприпасами длительных сроков хранения // Інтегровані технології та енергозбереження. 2013. №2. С. 121–125.
15. Анипко О.Б., Муленко А.О., Баулин Д.С., Черкашин А.Д. Проблема живучести стволов стрелкового оружия при применении боеприпасов послегарантийных сроков хранения // Інтегровані технології та енергозбереження. 2010. №3. С. 80–83.
16. Анипко О.Б., Гончаренко П.Д., Хайков В.Л. Преждевременные разрывы снарядов корабельной артиллерии и методы их предупреждения. Зарубежный опыт. // Збірник наукових праць Академії військово-морських сил імені П.С. Нахимова. – 2011. – №4(48). – С. 6–16.
17. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М., Гончаренко П.Д., Хайков В.Л. Живучесть нарезных и гладких стволов при использовании боеприпасов послегарантийных сроков хранения. Севастополь: Академия военно-морских сил имени П.С. Нахимова, 2012. 208 с.
18. Баулін Д.С. Методика проведення експериментального дослідження щодо відновлення характеристик піроксилінових порохів // Інтегровані технології та енергозбереження. 2022. №3. С. 30–41.

Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Baulin D.S., Horyelyshev S.A. Herontolohichni vlastyvoli porokhovyykh zaryadiv boeprypasiv ta yikh vplyv na pokaznyky zhyvuchosti strilets'koyi zbroyi: Monohrafiya. Kharkiv: Vyd-vo Natsional'noyi akademiyi Natsional'noyi hvardiyi Ukrainy, 2019. 119 p.
2. Anypko O.B., Busyak YU.M. Vnutrennyaya ballistyka stvol'nykh system pry pryimenenyy boeprypasov dlytel'nykh srokov khranenyia. Monohrafiya. KH.: AVV MVD Ukrainy, 2010 – 128 p.
3. Anypko O.B., Khaykov V.L. Analiz metodov otsenky sostoyannya porokhovyykh zaryadov kak élement systemy monytorynha artylleryyskykh boeprypasov // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2012. №3. P. 60–71.
4. Baulin D.S. Eksperymental'ne doslidzhennya vplyvu konstruktyvnykh kharakterystyk boeprypasiv na pochatkovu shvydkist' kul' // Zbirnyk naukovykh prats' "NADPS Ukrainy im. B.Khmel'nyts'koho". 2004. №31. Chastyna II. P. 5–7.
5. Honcharenko P.D. Yntehral'naya popravka v nachal'nyu skorost' na yznos stvola y herontolohycheskye yzmenenyia porokhovoho zaryada // Zbirnyk naukovykh prats' Akademiyi viys'kovo-mors'kykh syl imeni P.S. Nakhimova. 2011. №1 (5). P. 11–14.
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. Anypko O.B., Khaykov V.L. Tsvetometryia porokhovyykh élementov metatel'nykh zaryadov artylleryyskykh boeprypasov // Artylleryyskoe y strelkovee vooruzhenye. 2011. №1. P. 28–35.
8. Verteletsky V.F. Prohnozyrovanye yzmenenyia fizyko-khymycheskykh svoystv porokhovoho zaryada y nachal'noy skorosty 30 mm artylleryyskykh boeprypasov morskoy nomenklatury // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2012. №2. P. 24–31.
9. 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.
10. Anipko O.B., Baulin D.S. Analychna hipoteza dlya obgruntuvannya pryntsyypovoyi mozhlyvosti reheneratsiyi nitrotselyuloznykh porokhiv pislya tryvaloho zberihannya perekysom vodnyu // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2022. №4. P. 65–72.
11. Cherkashyn A.D. Proverka dostovernosti prohnoza y korrektsyya zavysymosti yzmenenyia nachal'noy skorosty puly 9 mm pystoletnoho patrona PM // Systemy ozbroynennya i viys'kova tekhnika. 2010. № 3. P. 90–92.
12. Anypko O.B. Rezul'taty éksperymental'noho yssledovannya vozdeystviya perekysy vodoroda na nytrotselyuloznye vysokomolekulyarnye soedynenyia // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2014. № 2. P. 50–55.
13. Oleg Anipko, Dmitro Baulin, Stanislav Horielyshev, Igor Boikov, Yurii Babkov, Oleksandr Oleksenko, Halyna Misiuk, Volodymyr Kutsenko, Mykhailo Ivanets, Valerii Voinov Study Of The Nitrocellulose Gunpowder Regeneration Process Using Hydrogen Peroxide. EUREKA: Physics and Engineering, 2023, № 5(43), P. 3–13.
14. Anypko O.B., Mulyenko A.O., Baulyn D.S. Éksperymental'noe yssledovanye yznosa stvola 5,45 mm avtomata Kalashnykova AK-74 pry strel'be boeprypasamy dlytel'nykh srokov khranenyia // Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya. 2013. №2. P. 121–125.

15. Anypko O.B., Mulyenko A.O., Baulyn D.S., Cherkashyn A.D. Problema zhyvuchesty stvolov strelkovoho oruzhya pry pryomenenyy boeprypasov posleharantyynykh srokov khranenyya // *Intehrovani tekhnolohiyi ta enerhozberezhennya*. 2010. №3. P. 80–83.

16. Anypko O.B., Honcharenko P.D., Khaykov V.L. Prezhdevremennyye razryvy snaryadov korabel'noy artylleryy y metody ykh preduprezhdenyya. Zarubezhnyy opyt. // *Zbirnyk naukovykh prats' Akademiyi viys'kovo-mors'kykh syl ymeny P.S. Nakhymova*. – 2011. – №4(48). – P. 6–16.

17. Anypko O.B., Busyak YU.M., Honcharenko P.D., Khaykov V.L. Zhyvuchest' nareznykh y hladkykh stvolov pry yspol'zovanny boeprypasov posleharantyynykh srokov khranenyya. Sevastopol': Akademya voenno-mors'kykh syl ymeny P.S. Nakhymova, 2012. 208 p.

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

УДК 355.014: 623.522

О. Б. Аніпко, д.техн.н., професор, Д. С. Баулін, к.техн.н., с.н.с.

ДОЦІЛЬНІ ТЕРМІНИ РЕГЕНЕРАЦІЇ НІТРОЦЕЛЮЛОЗНИХ ПОРОХОВИХ ЗАРЯДІВ ТРИВАЛИХ ТЕРМІНІВ ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРИВАЛІСТЬ ПІСЛЯРЕГЕНЕРАЦІЙНОГО ПЕРІОДУ ЇХ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ

В даний час проблемою багатьох країн світу є наявність в арсеналах, базах та складах великої кількості різноманітних боєприпасів, які знаходяться за межами гарантійних термінів зберігання. Відсутність в Україні виробничих потужностей з виготовлення боєприпасів призвела до того, що в даний час в експлуатації є боєприпаси, час зберігання яких перевищує 30 років.

Аналіз досліджень показав, що вже після 25 років зберігання через зміни енергетичних характеристик порохового заряду відбуваються зміни балістичних характеристик зброї, які неможливо відкоригувати введенням поправок в установки стрільби. Виникає питання доцільності застосування таких боєприпасів, як у точності виконання вогневих завдань та експлуатації озброєння загалом, так і у сфері безпеки особового складу.

Показана комплексна проблема оцінки стану зарядів, яка пов'язана з відсутністю у державі надійної системи моніторингу стану порохових зарядів боєприпасів, розроблення технології їх регенерації, утилізації та можливості застосування за призначенням. Перша з наведених проблем є ключовою, оскільки саме від її результатів залежить подальше продовження життєвого циклу боєприпасів.

Проведені експериментальні дослідження підтверджують, що при тривалому зберіганні спостерігаються зміни у хімічному складі нітроцелюлозних порохів. Зміна кольору порохових елементів підтверджує хімічні реакції, що відбуваються у них, з поступовим зменшенням їх маси.

Наведено, що у процесі регенерації маса порохового заряду збільшується на 3% шляхом насичення нітроцелюлози воднем.

Графічно показані пріоритетні часові рамки, коли проведення регенерації дає максимальний ефект.

Аналізуючи результати дослідження, використовуючи модель експлуатації боеприпасів, у життєвому циклі порохових зарядів вперше запропоновано застосувати період після регенерації, що дає змогу визначити час доцільного відновлення характеристик порохів. Він трохи коливатиметься для різних партій порохів, але, з достатньою ймовірністю, його тимчасові рамки можна визначити в 25–27 років.

Прогнозована можливість технологічно довести ефект від регенерації до 5 %. Це відповідає відновленню властивостей на рівень гарантійної експлуатації і її продовження вдвічі.

Ключові слова: пороховий заряд, нітроцелюлозний порох, балістичні характеристики, геронтологічні зміни, регенерація зарядів, післярегенераційний період/

О. Б. Анипко, д.техн.н., професор, Д. С. Баулин, к.техн.н., с.н.с.

ЦЕЛЕСООБРАЗНЫЕ СРОКИ РЕГЕНЕРАЦИИ НИТРОЦЕЛЛЮЛОЗНЫХ ПОРОХОВЫХ ЗАРЯДОВ ДЛИТЕЛЬНЫХ СРОКОВ ХРАНЕНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ПОСЛЕРЕГЕНЕРАЦИОННОГО ПЕРИОДА ИХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

В настоящее время проблемой многих стран мира является наличие в арсеналах, базах и складах большого количества разнообразных боеприпасов, находящихся вне гарантийных сроков хранения. Отсутствие в Украине производственных мощностей по производству боеприпасов привело к тому, что в настоящее время в эксплуатации есть боеприпасы, время хранения которых превышает 30 лет.

Анализ исследований показал, что уже после 25 лет хранения из-за изменения энергетических характеристик порохового заряда происходят изменения баллистических характеристик оружия, которые невозможно откорректировать введением поправок в установки стрельбы. Возникает вопрос о целесообразности применения таких боеприпасов, как в точности выполнения огневых задач и эксплуатации вооружения в целом, так и в сфере безопасности личного состава.

Показана комплексная проблема оценки состояния зарядов, связанная с отсутствием в государстве надежной системы мониторинга состояния пороховых зарядов боеприпасов, разработки технологии их регенерации, утилизации и возможности применения по назначению. Первая из приведенных проблем является ключевой, поскольку именно от ее результатов зависит дальнейшее продление жизненного цикла боеприпасов.

Проведенные экспериментальные исследования подтверждают, что при продолжительном хранении наблюдаются изменения в химическом составе нитроцеллюлозных порохов. Изменение цвета пороховых элементов подтверждает происходящие в них химические реакции с постепенным уменьшением их массы.

Представлено, что в процессе регенерации масса порохового заряда увеличивается на 3 % путем насыщения нитроцеллюлозы водородом.

Графически показаны приоритетные временные рамки, когда проведение регенерации дает максимальный эффект.

Анализируя результаты исследования, используя модель эксплуатации боеприпасов, в жизненном цикле пороховых зарядов впервые предложено применить период после регенерации, что позволяет определять время целесообразного восстановления характеристик порохов. Он будет немного колебаться для разных партий порохов, но, с достаточной вероятностью, его временные рамки можно определить в 25–27 лет.

Спрогнозована можливість технологічно довести ефект від регенерації до 5 %. Це буде відповідати відновленню властивостей на рівень гарантійної експлуатації і подальше продовження експлуатації порохів в 2 рази.

Ключевые слова: пороховий заряд, нітроцелюлозний порох, баллістическі характеристики, геронтологічні зміни, регенерація зарядів, післярегенераційний період.

O. Anipko, D. Baulin

EXPEDIENT REGENERATION PERIODS FOR NITROCELLULOSE POWDER CHARGES WITH LONG SHELF LIFE AND THE DURATION OF THE POST-REGENERATION PERIOD OF THEIR LIFE CYCLE

Currently, a problem in many countries of the world is the presence in arsenals, bases and warehouses of a large number of various ammunition that are beyond the guaranteed storage period. The lack of ammunition production capacity in Ukraine has led to the fact that currently there are ammunition in use whose storage time exceeds 30 years.

An analysis of the research showed that after 25 years of storage, due to changes in the energy characteristics of the powder charge, changes occur in the ballistic characteristics of the weapon, which cannot be corrected by introducing amendments to the firing settings. The question arises about the advisability of using such ammunition, both in accurately performing fire missions and operating weapons in general, and in the field of personnel safety.

The complex problem of assessing the state of charges is shown, associated with the lack in the state of a reliable system for monitoring the state of powder charges of ammunition, the development of technology for their regeneration, disposal and the possibility of using it for its intended purpose. The first of these problems is key, since the further extension of the life cycle of ammunition depends on its results.

Experimental studies have confirmed that changes in the chemical composition of nitrocellulose powders are observed during long-term storage. The change in color of the powder elements confirms the chemical reactions occurring in them with a gradual decrease in their mass.

It is presented that during the regeneration process the mass of the powder charge increases by 3 % by saturating the nitrocellulose with hydrogen.

The priority time frames for when regeneration gives the maximum effect are graphically shown.

Analyzing the results of the study, using the ammunition operation model, it was proposed for the first time to use a period after regeneration in the life cycle of powder charges, which makes it possible to determine the time of expedient restoration of the characteristics of gunpowder. It will fluctuate a little for different batches of gunpowder, but, with reasonable probability, its time frame can be determined at 25–27 years.

It is predicted that it will be possible to technologically increase the effect of regeneration to 5 %. This will correspond to the restoration of properties to the level of guaranteed operation and a further extension of the operation of the gunpowder by 2 times.

Keywords: powder charge, nitrocellulose powder, ballistic characteristics, gerontological changes, regeneration of charges, post-regeneration period.

В. В. Лебедєв, к.техн.н., доцент, Д. В. Мірошніченко, д.техн.н., професор,
О. В. Богоявленська, к.техн.н., доцент, Є. І. Литвиненко, к.техн.н. доцент,
Л. В. Соловей, старший викладач

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПАЛИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПОХІДНИХ БУРОГО ВУГІЛЛЯ ПРИ ОДЕРЖАННІ МЕМБРАН НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ БІОДЕГРАДАБЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Ключові слова: біодеградабельна матеріали, гібридні, похідні бурого вугілля, гумінові речовини, мембрани, очищення, важкі метали, адсорбція.

Вступ. В останні 10–15 років широке поширення знайшли гібридні полімерні композитні матеріали з біологічною активністю [1, 2]. Біологічним «інструментом» гібридних полімерних композитних матеріалів є іммобілізовані в полімерному носії мікроорганізми або біологічно-активні речовини органічної та неорганічної природи [3]. Функціоналізація полімерних поверхонь гібридних полімерних композитних матеріалів, як правило, забезпечується за рахунок хімічних або ковалентних зв'язків, низьких енергетичних взаємодій [4, 5], шляхом нековалентного фізичного притягнення, такого як адсорбція забруднювачів [6,7], антибактеріальних біоматеріалів [8–10] та систем доставки ліків [11–13].

При створенні гібридних полімерних композитних матеріалів особливо важливі природа полімерної матриці і біоактивних компонентів та умови їх формування. Ці фактори в кінцевому підсумку впливають на утворення ефективної композитної структури гібридних полімерних композитних матеріалів та їх експлуатаційні характеристики. У зв'язку з цим, використання різних неорганічних та органічних функціональних матеріалів із розмірами частинок нанорівня при створенні гібридних полімерних композитних матеріалів дуже перспективно, так як, по-перше, висока дисперсність частинки дозволяє забезпечити їх рівномірне розподілення в матриці, за рахунок чого можна досягти покращених фізико-механічних властивостей, по-друге, висока ступінь гомогенізації сумішей компонентів спрощує технологічний процес їх переробки, по-третє, комбінуючи оптимальний об'ємний вміст компонентів гібридних полімерних композитних матеріалів, можна створювати композиції з необхідними магнітними, сорбційними, діелектричними та іншими спеціальними властивостями. При цьому гібридні полімерні композитні матеріали можуть не використовувати лише одну або більше особливих функцій, але також забезпечують модульність матеріалів за допомогою комбінації функціональних компонентів.

Раніше нами було розглянуто напрям використання гібридної модифікації похідних бурого вугілля у вигляді гумінових речовин в рамках одержання композитних матеріалів на основі функціональної гібридної модифікації полілактиду (ПЛА) для застосування в сучасних наномедичних технологіях та препаратах, в процесах очищення та біоремедіації забруднених углеводородами різних об'єктів навколишнього середовища, адсорбції, розділенні та зберіганні газу, каталізі, зондуванні, електронних пристроях тощо

[16]. Такі полімерні гібридні композитні матеріали привернули увагу завдяки своїм особливим структурним та поверхневим характеристикам які і зумовлюють такі широкі функціональні напрями застосування.

Суміші ПЛА з ГР цікаві через їх потенційну можливість застосування як біомедичні каркаси для одержання адсорбентів забруднювачів та важких металів, антибактеріальних біоматеріалів, систем доставки ліків, сорбентів нафтовмісних природних, промислових і побутових вод та ін.

Встановлено [14], що забруднення важкими металами може бути зменшено за рахунок іонного обміну, комплексо-утворення і поверхневої адсорбції при участі ГР, в той час як навіть стійкі органічні забруднювачі спочатку адсорбуються, а потім розкладаються окислювально-відновними процесами. Стосовно функціональної дії ГР варто підкреслити той факт, що зв'язування іонів в них є особливим і розширює можливості звичайних іонообмінних смол [15].

Карбоксильні групи ГР пов'язують звичайні іони (Na^+ , K^+ або Mg^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+}) за рахунок кулонівських взаємодій, в той час як фенольні і фенолятні групи надзвичайно ефективні для хелатування металів (всі d-елементи, особливо Fe^{3+}). Крім того, гідратовані іони у вигляді фосфату зв'язуються через Н-містки і поверхневу адсорбцію («гідрофобний» ефект).

Мета статті – вивчення непаливного застосування похідних бурого вугілля при одержанні мембран на основі гібридних біодеградабельних матеріалів.

В роботі використовували наступні матеріали:

- полілактид марки Tegmatas TP-4000;
- гумінові речовини, отримані з бурого вугілля.

Мембрани для очищення води від важких металів одержували з гібридних біополімерних матеріалів на основі ПЛА та ГР у вигляді пористих полімерних плівок з розміром пор 20 мкм та робочою площею поверхні мембрани $28,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ з діаметром кола 6 см.

Дослідження мембран було проведено у безпроточній камері об'ємом $0,2 \text{ дм}^3$. Робочий тиск становив 0,2 МПа з температурою 20–23 °С. Розчин для очищення був одержаний за допомогою магнітної мішалки, щоб зменшити утворення желе швидкість обертання 500 об/хв.

Обговорення результатів. На рис. 1 наведено селективність мембранних гібридних біодеградабельних матеріалів на основі ПЛА та ГР. Було досліджено адсорбцію з низькоконцентрованих розчинів іонів металів. З рисунку 1 видно, що одержанні мембрани гібридних біодеградабельних матеріалів на основі ПЛА та ГР мають максимальну селективність вилучення іонів металів по відношенню Cu^{2+} – 95 % та Pb^{2+} – 94 %; а для таких металів, як Cd^{2+} , Hg^{2+} , Zn^{2+} , та Co^{2+} вона становить від 82 до 89%.

Також аналізували адсорбцію окремих іонів Cu^{2+} з одночасною адсорбцією кількох різних іонів металів (Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} та Zn^{2+}). Ця область концентрації була обрана на основі потенційного використання мембран гібридних біодеградабельних матеріалів на основі ПЛА та ГР як недорогих сорбційних мембран для екологічно безпечної адсорбції іонів токсичних металів, які часто зустрічаються в низьких, але все ще проблематичних і шкідливих концентраціях. Як бачимо, ефективність адсорбції для одиничних іонів Cu^{2+} становила майже 100 % у використаному діапазоні концентрацій. Його значення дещо знизилося щодо адсорбції із суміші іонів металів, але середня ефективність була вищою за 90 % для всіх використаних іонів металів (табл. 1).

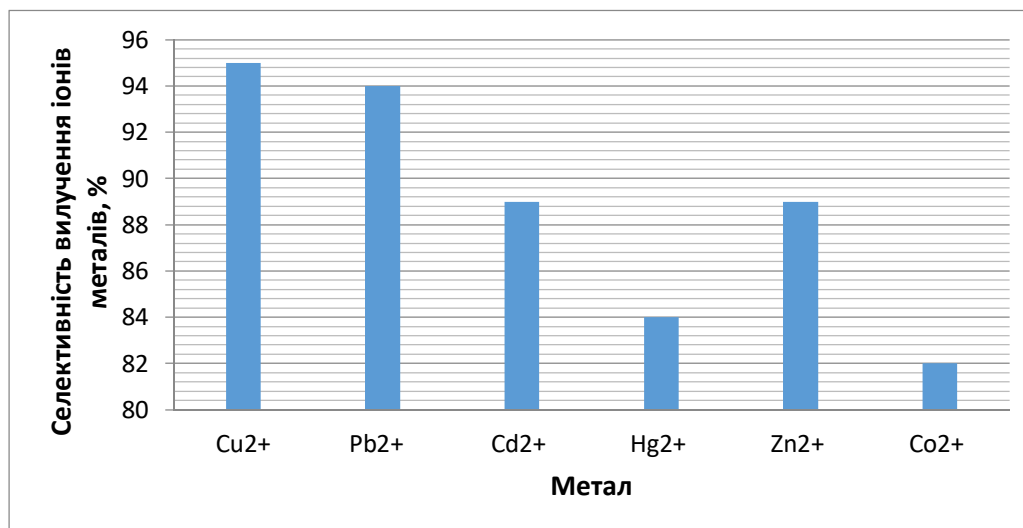


Рисунок 1 – Селективність вилучення іонів металів мембранами гібридних біодеградабельних матеріалів на основі ПЛІА та ГР

Таблиця 1 – Середні показники ефективності адсорбції окремих іонів Cu²⁺ та іонів Cd²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺ та Zn²⁺, адсорбованих із їх суміші

	Окремий розчин металу	Розчин металів			
	Cu ²⁺	Cd ²⁺	Cu ²⁺	Pb ²⁺	Zn ²⁺
Ефективність адсорбції, %	94%	89%	95%	94%	89%
Середня участь у загальній кількості адсорбції іонів, %		21%	23%	32%	24%
Коефіцієнт розподілу окремих іонів, л/г	0,903	0,246	0,647	0,433	0,125

Порівнюючи відсоток іонів металів, які адсорбувалися, можна побачити, що найлегше адсорбованим металом був свинець. Мідь і цинк адсорбувалися аналогічно. Кадмій демонстрував найнижчий відсоток, але його адсорбція була лише трохи гіршою, ніж у випадку міді та цинку.

Оскільки ефективність адсорбції у багатьох випадках була практично близька до 100%, а використовувані концентрації були низькими, було неможливо підібрати експериментальні дані за допомогою будь-якої із зазвичай використовуваних ізотерм адсорбції. Ми визначили «коефіцієнт розподілу» як нахил, отриманий із залежності адсорбованої кількості від рівноважної концентрації, де використовували дані з ефективністю нижче 100% (нульові рівноважні концентрації для 100% ефективності адсорбції не включалися в розрахунок). Найбільші значення отримано для одноразової адсорбції іонів Cu²⁺, у випадку адсорбції із суміші цей метал також мав найвищий коефіцієнт розподілу. Сильна адсорбція також виявлена для Pb²⁺. З іншого боку, адсорбція Zn²⁺ була, за «коефіцієнтом розподілу», відносно слабкою. Отримані значення «коефіцієнта розподілу» не повністю узгоджуються з результатами, наведеними в таблиці 1. Причиною є згадане

вище часткове виключення деяких даних адсорбції через нульову рівноважну концентрацію. Тому ці значення можна розглядати лише як додаткові для комплексної ілюстрації досліджуваної адсорбції (табл. 1).

Хоча середні частки міді та цинку в загальній кількості адсорбції були практично однаковими, їхній розподіл за міцністю зв'язку був різним. Як ми можемо бачити в таблиці 2, цинк був зв'язаний менш міцно, і більша частина була присутня в рухливій або іонообмінній формі.

Таблиця 2 – Середній вміст рухомої фази, іонообмінної фази, міцнозв'язаної фази та залишкової фази іонів Cu^{2+} та адсорбованих із їх суміші іонів Cd^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} та Zn^{2+}

	Окремий розчин металу	Розчин металів			
	Cu^{2+}	Cd^{2+}	Cu^{2+}	Pb^{2+}	Zn^{2+}
Рухома фаза	9,7%	14,6%	11,4%	12,1%	17,2%
Іонообмінна фаза	17,0%	25,4%	18,0%	19,6%	20,9%
Міцнозв'язана фаза	22,2%	29,4%	23,8%	24,1%	25,7%
Залишкова фаза	51,0%	29,9%	47,8%	44,2%	34,7%

Кадмій демонстрував подібний вміст у слабозв'язаній рухомій або іонообмінній формі. З іншого боку, мідь і свинець були сильно зв'язані, і лише невелика кількість цих металів могла бути вилужена, наприклад, у воду в природі. Як видно, окремі екстрагенти здатні вимивати різну кількість іонів металу, що відповідає різній спорідненості ГР до металу. Вода є слабким вилуговувачем, який може витягувати лише рухливі фракції іонів металів. Для отримання іонообмінної фракції іонів металу використовували 1 М розчин MgCl_2 . Іони металів, що екстрагуються 1 М розчином HCl , становлять фракцію міцнозв'язаних іонів металів. Розчинність метало-гумінових комплексів зменшується зі збільшенням співвідношення метал: ГР, які можуть бути пов'язані з поступовим зменшенням вільної іонізованої функціональної групи відповідно до цього збільшення.

Міцнозв'язані та залишкові фази були найвищими для міді та свинцю. Ці два метали значною мірою були зв'язані в сильні комплекси ГР, і лише дуже невелика їх кількість могла бути вимита за нормальних умов, як також підтвердив Девіч [17].

Одержані результати стійкості адсорбції суттєво змінюються та добре корелюють із віком та ступенем гуміфікації ГР. Використані в нашій роботі ГР належали до групи добре гуміфікованих, більш ароматичних з високим вмістом кислотних функціональних груп, що зумовлює їх високу комплексоутворювальну здатність до утворення стійких метало-гумінових комплексів.

Одержані результати показали, що розподіл іонів металів за міцністю зв'язку залежить від присутності іонів інших металів. Міцнозв'язана і залишкова фракції зменшилися у разі адсорбції із суміші іонів металів, ймовірно, через зайняття міцних місць зв'язування іншими іонами. Це було пов'язано зі зниженням ефективності адсорбції порівняно з адсорбцією іонів Cu^{2+} . З іншого боку, ефективність у всіх випадках була вищою за 80%, а в деяких випадках вона досягала 100%. Це дуже хороший результат щодо потенційного застосування гібридних біодеградабельних матеріалів на основі ПЛА та ГР як екологічно безпечних мембран для важких металів.

Висновки. Розроблені гібридні біодеградабельні матеріали на основі ПЛА та ГР, які були використанні як високоефективні сорбційні мембранні матеріали для зниження

вмісту важких металів у водних розчинах. Було виявлено, що вимивання іонів металів з мембранних гібридних біодеградабельних матеріалів на основі ПЛА та ГР у воду було дуже низьким, у більшості випадків він становив близько 10 % і не перевищував 20 %. Більшість іонів металу ($\geq 60\%$) були зв'язані дуже міцно і лише частково вимивались у сильно кислих умовах.

Література

1. El-Ghoul Y., Alminderej F.M., Alsubaie F.M., Alrasheed R., Almousa N.H. Recent Advances in Functional Polymer Materials for Energy // Water, and Biomedical Applications: A Review. *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 4327.
2. Zagho M.M., Hussein E.A. and Elzatahry A.A., Recent Overviews in Functional Polymer Composites for Biomedical Applications // *Polymers*. – 2018. – Vol. 10. – P. 739.
3. Díez-Pascual A.M., Chemical Functionalization of Carbon Nanotubes with Polymers: A Brief Overview // *Macromolecules*. – 2021. – Vol. 1. – P. 64–83.
4. Liu Y., Liu Z., Gao Y., Gao W., Hou Z. and Zhu Y. Facile Method for Surface-Grafted Chitooligosaccharide on Medical Segmented Poly(ester-urethane) Film to Improve Surface Biocompatibility // *Membranes*. – 2021. – Vol. 11. – P. 37.
5. Chen J.-C., Chen C.-H., Chang K.-C., Liu S.-M., Ko C.-L., Shih C.-J., Sun Y.-S. and Chen W.-C. Evaluation of the Grafting Efficacy of Active Biomolecules of Phosphatidylcholine and Type I Collagen on Polyether Ether Ketone: In Vitro and In Vivo // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 2081.
6. Mohamed M.G., Tsai M.-Y., Wang C.-F., Huang C.-F., Danko M., Dai L., Chen T., Kuo S.-W. Multifunctional Polyhedral Oligomeric Silsesquioxane (POSS) Based Hybrid Porous Materials for CO₂ Uptake and Iodine Adsorption // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 221.
7. Khan M.A., Govindasamy R., Ahmad A., Siddiqui M.R., Alshareef S.A., Hakami A.A.H. and Rafatullah M. Carbon Based Polymeric Nanocomposites for Dye Adsorption: Synthesis, Characterization, and Application // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 419.
8. Pereira A.M., Gomes D., A. da Costa, Dias S.C., Casal M., Machado R. Protein-Engineered Polymers Functionalized with Antimicrobial peptides for the Development of Active Surfaces // *Applied Sciences* vol. – 2021. – Vol. 11. – P. 5352.
9. Charoensri K., Rodwihok C., Wongratanaphisan D., Ko J.A., Chung J.S., Park H.J., Investigation of Functionalized Surface Charges of Thermoplastic Starch/Zinc Oxide Nanocomposite Films Using Polyaniline: The Potential of Improved Antibacterial Properties // *Polymers*. – 2021. – Vol. 13. – P. 425.
10. Brun P., Zamuner A., Battocchio C., Cassari L., Todesco M., Graziani V., Iucci G., Marsotto M., Tortora L., Secchi V. Bio-Functionalized Chitosan for Bone Tissue Engineering // *International Journal of Molecular Sciences*. – 2021. – Vol. 22. – P. 5916.
11. Jhaveri J., Raichura Z., Khan T., Momin M., Omri A. Chitosan Nanoparticles- Insight into Properties, Functionalization and Applications in Drug Delivery and Theranostics // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26(2) . – P. 272.
12. Beagan A.M., Alghamdi A.A., Lahmadi S.S., Halwani M.A., Almeataq M.S., Alhazaa A.N., Alotaibi K.M. and Alswieleh A.M. Folic Acid-Terminated Poly(2-Diethyl Amino Ethyl Methacrylate) Brush-Gated Magnetic Mesoporous Nanoparticles as a Smart Drug Delivery System // *Polymers*. – 2020. – Vol. 13. – P. 59.
13. Donoso-González O., Lodeiro L., Aliaga Á.E., Laguna-Bercero M.A., Bollo S., Kogan M.J., Yutronic N. and Sierpe R. Functionalization of Gold Nanostars with Cationic β -

Cyclodextrin-Based Polymer for Drug Co-Loading and SERS Monitoring // *Pharmaceutics*. – 2021. – Vol. 13. – P. 261.

14. Huang Y.-N., Qian T.-T., Dang F., Yin Y.-G., Li M., Zhou D.-M. Significant contribution of metastable particulate organic matter to the natural formation of silver nanoparticles in soils // *Nature Communications*. – 201. – Vol. 10. – P. 3775.

15. Brown P.A., Gill S.A. and Allen S.J. Metal removal from wastewater using peat // *Water Research*. – 2000. – Vol. 34. – P. 3907–3916.

16. Sahalai D., Bilets D., Lebedev V., Mysiak V., Miroshnichenko D., Sinitsyna A. Hybrid Biopolymer Nanocomposite Materials for Ecological and Biomedical Applications. Proceedings of the 2022 IEEE 12th International Conference. Nanomaterials: Applications and Properties. (NAP 2022). – 2022. – P. 184251.

17. Dević G. J. Characterization of eluted metal ions by sequential extraction from Krepoljin coal basin, Serbia: mechanisms of metal interaction // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. – 2016. – Vol. 38(13). – P. 1912–1917.

УДК 678

В. В. Лебедєв, Д. В. Мірошніченко, О. В. Богоявленська, Є. І. Литвиненко,
Л. В. Соловей

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕПАЛИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ПОХІДНИХ БУРОГО ВУГІЛЛЯ ПРИ ОДЕРЖАННІ МЕМБРАН НА ОСНОВІ ГІБРИДНИХ БІОДЕГРАДАБЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті показані дослідження з вивчення непаливного застосування похідних бурого вугілля при одержанні мембран на основі гібридних біодеградабельних матеріалів. В роботі використовували полілактид марки Terramac TP-4000, гумінові речовини, отримані з бурого вугілля. Мембрани для очищення води від важких металів одержували з гібридних біополімерних матеріалів на основі полілактиду та гумінових речовин у вигляді пористих полімерних плівок з розміром пор 20 мкм та робочою площею поверхні мембрани $28,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ з діаметром кола 6 см. Використані в нашій роботі гумінові речовини належали до групи добре гуміфікованих, більш ароматичних з високим вмістом кислотних функціональних груп, що зумовлює їх високу комплексоутворювальну здатність до утворення стійких метало-гумінових комплексів. Розроблені гібридні біодеградабельні матеріали на основі полілактиду та гумінових речовин були використанні як високоефективні сорбційні мембранні матеріали для зниження вмісту важких металів у водних розчинах. Одержанні мембрани гібридних біодеградабельних матеріалів на основі полілактиду та гумінових речовин мають максимальну селективність вилучення іонів металів по відношенню Cu^{2+} – 95 % та Pb^{2+} – 94 %; а для таких металів, як Cd^{2+} , Hg^{2+} , Zn^{2+} , та Co^{2+} вона становить від 82 до 89%. Порівнюючи відсоток іонів металів, які адсорбувалися, можна побачити, що найлегше адсорбованим металом був свинець. Мідь і цинк адсорбувалися аналогічно. Кадмій демонстрував найнижчий відсоток, але його адсорбція була лише трохи гіршою, ніж у випадку міді та цинку. Найбільші значення отримано для одноразової адсорбції іонів Cu^{2+} , у випадку адсорбції із суміші цей метал також мав найвищий коефіцієнт розподілу, сильна адсорбція також виявлена для Pb^{2+} , з іншого боку, адсорбція Zn^{2+} була, за «коефіцієнтом розподілу», відносно слабкою. Міцнозв'язані та залишкові фази були найвищими для міді та свинцю, ці два метали значною мірою

були зв'язані в сильні комплекси гуміновими речовинми і лише дуже невелика їх кількість могла бути вимита за нормальних умов. Було виявлено, що вимивання іонів металів з мембранних гібридних біодеградабельних матеріалів на основі полілактиду та гумінових речовин у воду було дуже низьким, у більшості випадків він становив близько 10 % і не перевищував 20 %. Більшість іонів металу (≥ 60 %) були зв'язані дуже міцно і лише частково вимивались у сильно кислих умовах. Одержані результати стійкості адсорбції суттєво змінюються та добре корелюють із віком та ступенем гуміфікації гумінових речовин.

Ключові слова: біодеградабельна матеріали, гібридні, похідні бурого вугілля, гумінові речовини, мембрани, очищення, важкі метали, адсорбція.

В. В. Лебедев, Д. В. Мирошніченко, Е. В. Богоявленская, Е. И. Литвиненко,
Л. В. Соловей

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕТОПЛИВНОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРОИЗВОДНЫХ БУРОГО УГЛЯ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ ГИБРИДНЫХ БИОДЕГРАДАБЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В статье показаны исследования по изучению нетопливного применения производных бурых углей при получении мембран на основе гибридных биodeградабельных материалов. В работе использовали полилактид марки Tetragas TP-4000, гуминовые вещества, полученные из бурых углей. Мембраны для очистки воды от тяжелых металлов получали из гибридных биополимерных материалов на основе полилактида и гуминовых веществ в виде полимерных пористых пленок с размером пор 20 мкм и рабочей площадью поверхности мембраны $28,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ с диаметром круга 6 см. Использованы в наш работе гуминовых веществ принадлежали к группе хорошо гуммифицированных, более ароматических с высоким содержанием кислотных функциональных групп, что приводит к их высокой комплексообразующей способности к образованию устойчивых металл-гуминовых комплексов. Разработанные гибридные биodeградабельные материалы на основе полилактида и гуминовых веществ были использованы в качестве высокоэффективных сорбционных мембранных материалов для снижения содержания тяжелых металлов в водных растворах. Получение мембраны гибридных биodeградабельных материалов на основе полилактида и гуминовых веществ имеют максимальную селективность извлечения ионов металлов по отношению к Cu^{2+} – 95 % и Pb^{2+} – 94 %; а для таких металлов, как Cd^{2+} , Hg^{2+} , Zn^{2+} и Co^{2+} , она составляет от 82 до 89%. Сравнивая процент адсорбированных ионов металлов, можно увидеть, что легче всего адсорбированным металлом был свинец, медь и цинк адсорбировались аналогично, при этом кадмий демонстрировал самый низкий процент, но его адсорбция была немного хуже, чем в случае меди и цинка. Наибольшее значение получено для однократной адсорбции ионов Cu^{2+} , в случае адсорбции из смеси этот металл также имел самый высокий коэффициент распределения, а сильная адсорбция также обнаружена для Pb^{2+} . С другой стороны, адсорбция Zn^{2+} была, по «коэффициенту распределения», относительно слабой. Крепкие и остаточные фазы были самыми высокими для меди и свинца, эти два металла в значительной степени были связаны в сильные комплексы гуминовыми веществами и только очень небольшое их количество могло быть вымыто при нормальных условиях. Было обнаружено, что вымывание ионов металлов из мембранных гибридных биodeградабельных ма-

териалов на основе полилактида и гуминовых веществ в воду было очень низким, в большинстве случаев оно составляло около 10 % и не превышало 20 %. Большинство ионов металла ($\geq 60\%$) были связаны очень прочно и частично вымывались в сильно-кислых условиях. Полученные результаты стойкости адсорбции существенно изменяются и хорошо коррелируют с возрастом и степенью гумификации гуминовых веществ.

Ключевые слова: биodeградебельные материалы, гибридные, производные бурого угля, гуминовые вещества, мембраны, очистка, тяжелые металлы, адсорбция.

V. V. Lebedev, D. V. Miroshnichenko, O. V. Bogoyavlenska, E. I. Litvinenko, L. V. Solovey

STUDY OF NON-FUEL APPLICATION OF BROWN COAL DERIVATIVES IN THE PRODUCTION OF MEMBRANES BASED ON HYBRID BIODEGRADABLE MATERIALS

The article shows research into the non-fuel use of brown coal derivatives in the production of membranes based on hybrid biodegradable materials. The work used polylactide brand Terramac TP-4000, humic substances obtained from brown coals. Membranes for water purification from heavy metals were obtained from hybrid biopolymer materials based on polylactide and humic substances in the form of polymer porous films with a pore size of 20 microns and a working surface area of the membrane of $28.26 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ with a circle diameter of 6 cm. Used in our The work of humic substances belonged to the group of well-humified, more aromatic with a high content of acidic functional groups, which leads to their high complexing ability to form stable metal-humic complexes. The developed hybrid biodegradable materials based on polylactide and humic substances were used as highly effective sorption membrane materials to reduce the content of heavy metals in aqueous solutions. Obtaining membranes of hybrid biodegradable materials based on polylactide and humic substances have maximum selectivity for the extraction of metal ions in relation to Cu^{2+} – 95 % and Pb^{2+} – 94 %; and for metals such as Cd^{2+} , Hg^{2+} , Zn^{2+} and Co^{2+} , it ranges from 82 to 89 %. Comparing the percentage of metal ions adsorbed, it can be seen that the easiest adsorbed metal was lead, copper and zinc adsorbed similarly, with cadmium showing the lowest percentage, but its adsorption was slightly worse than in the case of copper and zinc. The highest value was obtained for single adsorption of Cu^{2+} ions; in the case of adsorption from a mixture, this metal also had the highest distribution coefficient, and strong adsorption was also found for Pb^{2+} . On the other hand, the adsorption of Zn^{2+} was, according to the “partition coefficient,” relatively weak. Strong and residual phases were highest for copper and lead, these two metals were largely bound into strong complexes by humic substances and only a very small amount could be washed out under normal conditions. It was found that the leaching of metal ions from membrane hybrid biodegradable materials based on polylactide and humic substances into water was very low, in most cases it was about 10 % and did not exceed 20 %. Most of the metal ions ($\geq 60\%$) were very tightly bound and were partially leached out under strongly acidic conditions. The obtained results of adsorption resistance vary significantly and correlate well with the age and degree of humification of humic substances.

Keywords: biodegradable materials, hybrid, brown coal derivatives, humic substances, membranes, purification, heavy metals, adsorption.

І. М. Фик, аспірант

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБКИ ШЕБЕЛИНСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,
м. Харків, Україна*

Ключові слова: промислова газонасність родовища, пластовий тиск, обводнення родовища, відновлення запасів газу.

Вступ. Геолого-технологічні передумови відновлення запасів та стабілізації видобутку газу на прикладі Шебелинського ГКР

В роботі розглядаються та аналізуються основні результати розробки Шебелинського газоконденсатного родовища (ГКР) з точки зору можливого відновлення запасів газу в покладах, що розробляються, за рахунок перетоків газу з глибоких горизонтів. Обґрунтовано, що при зниженні річного видобутку газу до 1700–1900 млн. м³ видобуток буде компенсований перетоками. Відновлення запасів газу Шебелинського ГКР забезпечить довгострокову його розробку із щорічним видобутком не менше 1700–1800 млн м³ (50–90 років). Показано, що станом на 01.01.2023 р., спостерігається річний видобуток газу в об'ємі 1800 млн. м³, що підтверджує попередні теоретичні прогнози автора та обґрунтовує врівноваженість об'ємів видобутку газу та перетоків з глибоких горизонтів.

Аналіз публікацій. Останнім часом в опублікованих дослідженнях все частіше наводяться обґрунтування можливості відновлення запасів на старих виснажених газоконденсатних родовищах за рахунок перетоків газу з глибоких горизонтів [1,2,3,4,5]

В роботі Рудька О.І., Бондаря В.І., Ловинукова В.І. та інших [3] наведені матеріали сучасних концепцій формування вуглеводневих покладів в основу яких вкладено-ловний чинник – дегазація Землі.

В роботі [6] академік Лукін О.Ю. висловив думку, що глибокозалегаючі газоконденсатні родовища перебувають в процесі постійного формування, причому в такому темпі, який зіставляється з темпами інтенсивного видобутку газу.

Виходячи із вищенаведеного можна припустити, що ймовірними територіями дегазації Землі можуть бути нафтогазоконденсатні родовища, а їх виснаження зумовлює збільшення градієнтів тисків між покладами, з пониженими пластовими тисками та глибокими газонасиченими горизонтами з високими ми пластовими тисками та розвиненою глибинною тектонікою рис. 1.

Шебелинське газоконденсатне родовище (ГКР) відкрите в 1950 році, приурочене до крупної брахіантиклинальної складки, витягнутої з північного заходу на південний схід, і являє собою єдиний масивно-пластовий поклад зі спільним положенням газоводяного контакту на відмітці – 2270 м. Висота поверху газонасності покладу досягає 1160 м. Площа газонасності 232 км² [1, 2]. Промислова газонасність родовища приурочена до відкладів святогорської і картамиської світ нижньої пермі і араукаристової світи верхнього карбону. Характерними особливостями родовища є його багатопластовість, літологічна неоднорідність по площі і розрізу, низька (в основному) газонасиченість і

проникність, наявність тектонічних порушень, суттєве погіршення колекторських властивостей пластів у напрямку знизу вгору і від центральної до периферійної частини покладу. Піщано-алевролітові колектори характеризуються відносно низькою пористістю (11–15 %), проникністю (0,005–0,012 мкм²) і коефіцієнтом газонасиченості (0,4–0,8) [1, 2, 3].

На рис. 1 наведено структурну карту Шебелинського родовища по покрівлі світи мідистих пісковиків з нанесенням всіх експлуатаційних свердловин.

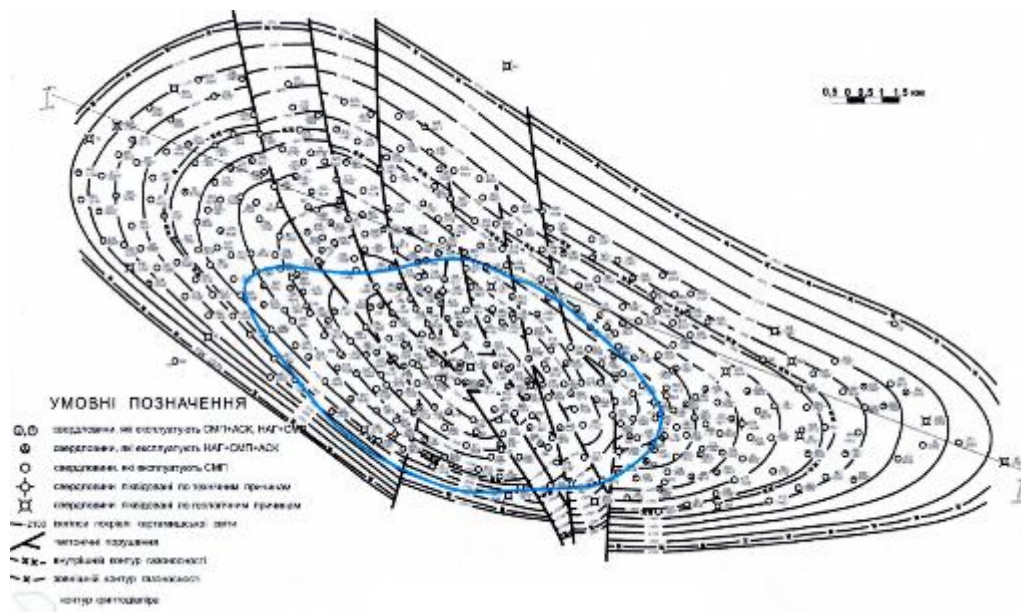


Рисунок 1 – Структурна карта горизонту СМП Шебелинського ГКР за матеріалами ГПУ «Шебелинкагазвидобування» [1]

Вперше в 1959 році на розгляд ДКЗ було представлено підраховані об’ємним методом запаси газу в об’ємі 550 млрд.м³, однак затверджені були в об’ємі 400 млрд.м³. Подальшому, враховуючи складну будову родовища, літологічну мінливість продуктивних пластів і незначний об’єм кернавого матеріалу, об’ємний метод підрахунку запасів на Шебелинському родовищі було признано неприйнятним. Підрахунок запасів газу по падінню пластового тиску було вперше виконано УкрНДІгазом в 1963 році та затверджено в об’ємі 466 млрд.м³.

В 1969 році на баланс Мінгазпрому було прийнято початкові запаси газу в об’ємі 500 млрд.м³. В таблиці 1 наведено основні віхи історії затвердження та автори підрахунків запасів Шебелинського родовища.

Починаючи з 2001 року, УкрНДІгазом запаси газу були прийняті для газодинамічних розрахунків – 712 млрд.м³. З родовища було доbito 588,123 млрд.м³ газу, що складало 90,5 % від початкових затверджених запасів. Пластовий тиск на той час знизився з 23,77 до 3,22 МПа.

Залишкові промислові запаси Шебелинського родовища станом 01.01.22 р. оцінюються в 107,8 млрд.м³ від проектних урахуванням приросту запасів.

Однак всі дослідження запасів газу Шебелинського ГКР на даний час враховують лише запаси колекторів діючих експлуатаційних об’єктів, враховуючи як обводнення, так і підключення в розробку низькопроникних периферійних зон і пропластків. Досліджень в напрямку перетоків газу з глибокозалегаючих горизонтів проводилось частково [2, 3,4,6].

Таблиця 1 – Історія нарощування, затвердження та основні результати підрахунків запасів Шебелинського родовища

Організація, що здійснювала підрахунок, рік підрахунку	Головні спеціалісти, які здійснювали підрахунок	Метод підрахунку	Запаси газу, млрд.м ³		Примітка
			Рекомендовані	Затверджені ДКЗ або прийнято на Держбаланс	
УкрНДГРІ, Львів, 1959 р.	Сініцин В.Я. Войцицький В.П.	Об'ємний	500	400	У зв'язку зі складністю будови і літології метод було визнано непридатним
УкрНДГаз, Харків, 1963 р.	Григор'єв В.С.	Об'ємний, падіння пластового тиску	529-466	466	Поклади були не повністю задреновані
УкрНДГаз, Харків, 1969 р.	Григор'єв В.С. Вороной Є.Є.	Об'ємний, падіння пластового тиску	600	500	Прийнято на баланс Мінгазпрому
УкрНДГаз, Харків, 1987 р.	Григор'єв В.С. Фик І.М. Бікман Є.С.	Падіння пластового тиску	705-744	650	Розрахунки проведено з урахуванням обводнення, затверджені ДКЗ
УкрНДГаз, Харків, 1990–2005 р.р.	Григор'єв В.С. Фик І.М. Руднева К.І.	Падіння пластового тиску	712	Не розглядалося	Розрахунки наведені в поточних аналізах розробки
УкрНДГаз, ГПУ «Шебелинкагазвидобування», Харків, 2006–2008 р.р.	Лизанець А.В. Лагутін А.А. Волосник Є.О.	Падіння пластового тиску	674–777	Прийнято на Держбаланс 688	Запаси розраховували з оцінкою приросту запасів газу
2010–2020	Запаси газу приймалися на рівні 712 млрд.м ³				

Результати та обговорення. Для того щоб дослідити наявність перетоків з глибоких горизонтів Шебелинського ГКР, перш за все, треба відокремити вплив інших факторів підтримування пластового тиску безпосередньо в покладах, що розробляються. До таких факторів слід віднести:

- обводнення покладів за контурними водами;
- внутрішній водонапірний режим;
- просідання поверхні над родовищем;
- об'ємна пружність залишкової води, газу та породи колектора.

На рис. 2 показано, що в 2020 році середній пластовий тиск практично стабілізувався з північного заходу на південний схід по лінії I-I на рівні 20 МПа.

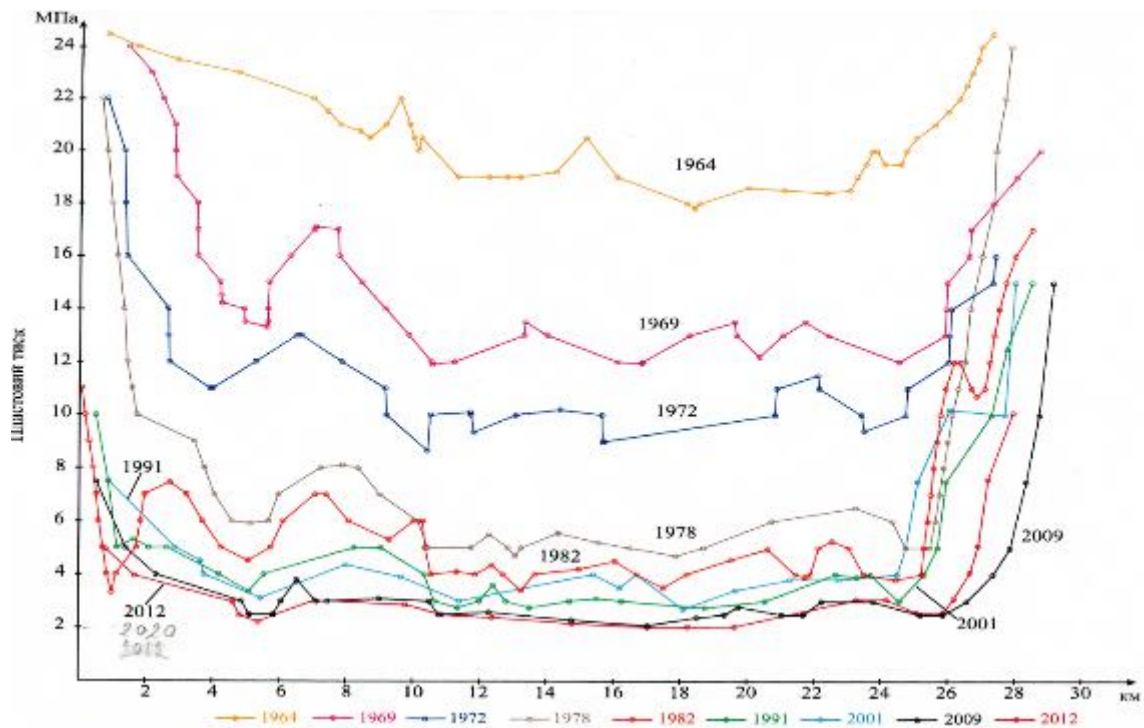


Рисунок 2 – Динаміка розподілу пластового тиску в часі Шебелинського ГКР по лінії I-I

На рис. 3 показано зони вибіркового обводнення родовища по всім горизонтам, а в табл. 2 наведено об'єми пластової води, що увійшла в поклади за весь період розробки.

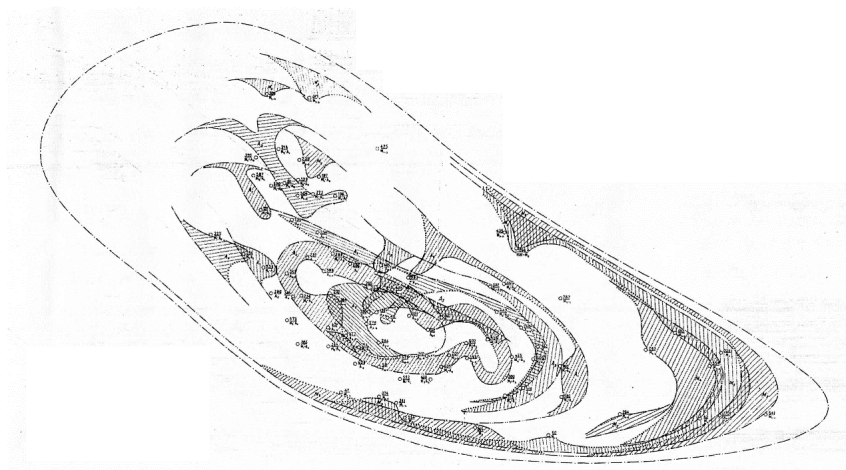


Рисунок 3 – Схема обводнення продуктивних горизонтів Шебелинського родовища

Таблиця 2 – Параметри обводнених зон газоносних горизонтів Шебелинського родовища

Горизонт	Ефективна товщина, м	Коефіцієнт пористості	Коефіцієнт газонасиченості	Коефіцієнт залишкової газонасиченості	Площа обводнення, 10 ⁶ м ²	Об'єм обводнення, 10 ⁶ м ³
M ₂	2,0–14,0	0,10–0,14	0,30–0,62	0,11–0,30	12,15	4,48
M ₃	1,6–16,3	0,09–0,24	0,50–0,70	0,19–0,52	13,06	11,5
M ₄	6,4–8,8	0,1	0,5	0,36	7,94	0,96
M ₅	4,0–6,5	0,13	0,55	0,35–0,37	1,37	0,17
A ₀	10,4–19,2	0,18–0,22	0,70–0,83	0,60–0,63	5,94	2,5
A ₁	1,0–5,0	0,12–0,16	0,55–0,62	0,21–0,45	4,72	0,6
A ₂	3,8–6,8	0,09–0,12	0,38–0,57	0,18–0,25	4,14	0,56
A ₃	9,0–16,0	0,12–0,23	0,54–0,88	0,30–0,38	4,81	2,73
A ₄	3,2–23,0	0,12–0,22	0,55–0,78	0,23–0,54	4,76	10,25
A ₅	3,2–10,0	0,10–0,16	0,42–0,62	0,17–0,35	1,62	0,31
A ₆	30	0,26	0,89	0,63	2,75	5,58

Аналіз обводнення Шебелинського родовища показав що:

– максимально обводнені горизонти M₃– 12,5 млн.м³, A₄ – 10,3 млн.м³ води, мінімальне обводнення спостерігається в горизонтах M₄, M₅, A₁, A₂, A₅ – 0,169 – 0,959 млн.м³ води. Хомогенні відклади взагалі не обводнюється в силу літологічної обмеженості. Якщо сумарний об'єм обводнення горизонтів в 1989 році складав 40,6 млн.м³ води, то станом на 2009 рік оцінюється в об'ємі 80 млн.м³. Тобто за 20 років в поклади додатково увійшло всього 40 млн.м³ води при пониженні середнього пластового тиску з 12,0 до 2,5 МПа. В даний час об'єм води складає 96 млн.м³ що вторгалась в продуктивні горизонти табл. 3 [6].

З таблиці 1 видно, що запаси газу продовжували нарощуватись і збільшилися офіційно з 400 млрд.м³ (1959 р.) до 688 млрд.м³ (2008 р.). Однак рядом вчених і спеціалістів Григор'єв В.С, Фик І.М., Бікман Є.С., Лизанець А.В., Лагутін А.А., Волосник Є.О. в своїх дослідженнях доводять, що запаси газу Шебелинського родовища можуть сягати до 777 млрд.м³ і більше.

В роботах [1,2,3] відмічалось, що характерною особливістю Шебелинського ГКР є поступове збільшення дренажного об'єму покладу внаслідок підключення в розробку периферійних зон покладу і низько проникних газонасичених пропластків, між пластових перетоків газу с ростом градієнтів пластових тисків.

В цілому на цей час для Шебелинського родовища характерно наступне:

- загального піднімання ГВК на родовищі не спостерігається, обводнення пластовими водами носить вибіркового характеру;
- пружно-водонапірний режим проявляє себе в окремих горизонтах з хорошими колекторськими властивостями та обмеженими водонапірними системами;
- коефіцієнт залишкової газонасиченості обводнених коливається в межах 0,11–0,54;
- сумарний об'єм обводнення пластовими водами не перевищує 96 млн.м³ (табл. 2).

В таблиці 3 наведено співставлення обсягів обводнення та середні пластові тиски в Шебелинському ГКР по роках:

Таблиця 3 – Співвставлення обсягів обводнення та середні пластові тиски в Шебелинському ГКР по роках

Рік	Q _{обв.} , МЛН.М ³	P _{пл} середнє, МПа
1964*	0	23,8
1989	40,6	12,0
2009	80,0	2,5
2016	90,0	2,08
2022	96,0	2,00

Примітка * – 1964 рік прийнято як початок зрушення водонапірної системи в газові поклади

Автором розраховані статистичні залежності об'ємів обводнення від часу (Q_{обв}(t), а також залежність об'ємів обводнення від пластового тиску (Q_{обв} (P_{пл})). Отриманні рівняння мають вигляд:

$$Q_{обв}(t) = 1.758 \cdot t - 3454 \quad r = 0,998; \quad (1)$$

$$Q_{обв} (P_{пл}) = -33,8 \cdot \ln(P_{пл}) + 114,4 \quad r = 0,967. \quad (2)$$

Із отриманих кореляційних рівнянь 1 і 2 слідує, що залежності об'ємів обводнення від часу і від тиску ведуть себе неадекватно і вступають у протиріччя, оскільки на пізній стадії розробки Шебелинського родовища залежність Q_{обв} від P_{пл} показує практичну стабілізацію пластового тиску відносно незначним, але різким ростом об'ємів обводнення при падінні пластового тиску з 2,5 МПа до 2,08 МПа за період з 2009 до 2016 року.

Газонасичений об'єм пор Шебелинського ГКР складає 0,576 10⁹ м³, в той час, як об'єм обводнення станом на 2022 рік складає 96 млн.м³. Тобто об'єм обводнення на 3 порядки менший ніж об'єм газонасичених пор і не може серйозно впливати на режим розробки родовища і підтримання пластового тиску.

При цьому похибка підрахунку запасів по падінню пластового тиску за рахунок зовнішнього вторгнення пластових вод не перевищує 0,5 %. Об'єм газу, який защемлений в обводнених зонах, не перевищує 2 % від початкових запасів.

Щодо обводнення колекторів за рахунок внутрішнього водонапірного режиму просідання поверхні, то його кількісне визначення є більш складним, однак його наближену оцінку виконано нами наступним чином. В роботах [7, 8] авторами показано можливість просочення пластовий води в газонасичений поровий простір.

Відомо, що територія поверхні по площі Шебелинського родовища просіла в середньому на 0,5 м [1]. Цілком зрозуміло, що цей процес пов'язаний з розробкою газових покладів і пониженням пластового тиску з 23,8 МПа до 2,8МПа. Якщо площа родовища складає 246·10⁶ м², то в газові поклади увійшло 123·10⁶ м³ внутрішньої пластової води (перетоки, дифузія води із контактуючих водонасичених порід і глинистих пластів).

Виходячи із того, що об'єм пор газонасичених колекторів складає 2,945 ·10⁹ м³, обводнення за рахунок внутрішнього водонапірного режиму складе 4,2 % від початкового газонасиченого об'єму колекторів.

Таким чином, загальний об'єм пластових вод, що увійшли в поклади Шебелинського родовища за рахунок зовнішнього і внутрішнього водонапірного режимів станом на 01.01.2015 року складав 203·10⁶ м³.

Наступним фактором, що впливає як на підрахунок запасів по падінню пластового тиску, так і на розробку родовища, є об'ємна пружність залишкової води і породи

колектора. Так, при падінні пластового тиску на 20 МПа об'єм залишкової води збільшився (розширився) на 11 млн.м³. Об'єм же породи, яка розширилась у "свій" поровий простір, складе 60 млн.м³. Наведені фактори працюють аналогічно, як і внутрішній водонапірний режим.

В цілому, з урахуванням зовнішнього обводнення, внутрішнього водонапірного режиму, об'ємної пружності залишкової води та гірських порід, просідання поверхні, газонасичений поровий об'єм покладів зменшився на 274 млн.м³. Таким чином, сумарне зменшення газонасиченого порового об'єму колекторів і неколекторів (початкове значення якого становило $3,521 \cdot 10^9$ м³) складає до 8 % від початкового. Тобто, суттєвого впливу як на підрахунок запасів, так і на розробку родовища за рахунок наведених факторів не спостерігається.

Закачка газу в продуктивні горизонти Шебелинського ГКР не проводилась і цей фактор не може вплинути на підтримування пластового тиску [9].

Виходячи із вищенаведеного можна припустити, що на Шебелинському ГКР існує інший фактор впливу на підтримування пластового тиску і таким фактором можуть бути перетоки газу з глибоких горизонтів, тобто відновлення запасів газу [1,2,3].

Щодо Шебелинського ГКР, то найбільш вдало пояснює як формування, так і можливість перетоків газу з глибоких горизонтів в поклади, що розробляються, геологічний профіль Верповського та Гладченко О.О., наведені в роботах [1, 3]. Автори показали, що міграція вуглеводнів можлива тектонічними порушеннями, як на стадії формування покладу, так і на стадії розробки (рис 4).

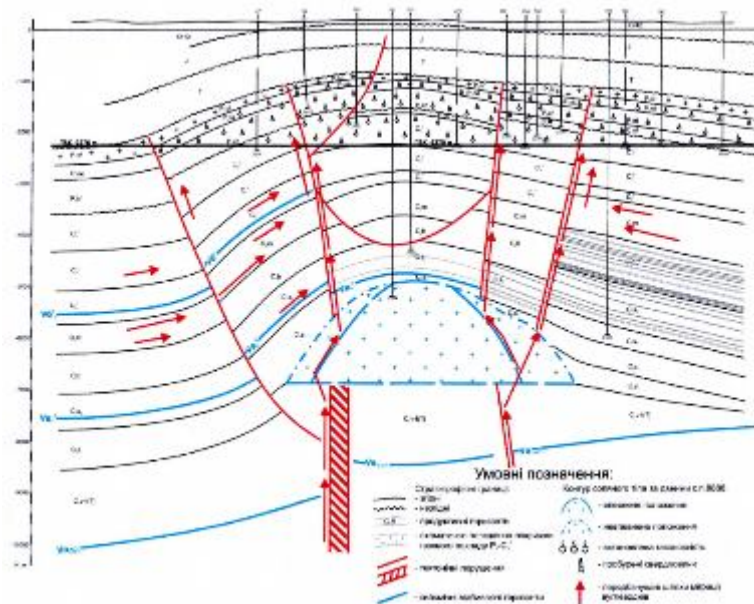


Рисунок 4 – Сейсмологічний розріз по лінії сеймопрофілю 02, 8884 Шебелинського ГКР [1]

Аналогічні дослідження були проведені Чепілем П.Н. в роботі «Друге життя родовищ нафти та газу, міф чи реальність» [12].

Буріння 12 глибоких свердловин (до 5 тис.м) на Шебелинському ГКР показало наявність газонасичених ущільнених колекторів, були навіть окремі викиди газу при бурінні, що свідчить про загазованість покладів карбону по всій глибині. Однак, промислових покладів, як і надійних покрівель (флюїдоупорів) виявлено не було. Остання глибока свердловина № 888 глибиною до 6000 м підтвердила загазованість, але покладів та флюїдоупорів виявлено не було.

Враховуючи широкую сітку диз'юнктивних дислокацій на Шебелинському родовищі, їх підтвердження глибоким бурінням, можна вважати, що тектонічні порушення можуть бути шляхами і сучасної міграції вуглеводнів до покладів світи мідиєвих пісковиків та араукаритової світи тим більше, що пластовий тиск в них знизився до 2,00 МПа, а тиск на великих глибинах досягає 40-50 МПа і вище, що і зумовило можливість перетоків газу в розроблений поклад виходячи із теорії дегазації землі.

В ході дослідження був проведений аналіз розробки родовища, в результаті якого виявлено, що річний об'єм перетоку газу в поклад, що розробляється, із глибоких покладів складає 1,7–1,9 млрд.м³ 5].

В роботі [11] автором показано що джерелом відновлення запасів газу може бути вся товща порід нижче ГВК – 2270 м; її приблизні запаси (неконденсійні) складають приблизно 400 млрд м³.

На рис. 5 показано періоди розробки Шебелинського ГКР з 1980 по 2023 р.р. Слід зауважити, що в період 1999 по 2003 рік, річні обсяги видобутку газу були знижені до 1800–1900 млн. м³, при цьому пластовий тиск стабілізувався на рівні 3,3 МПа. В таблиці 4 наведені окремо пластові тиски та річні об'єми видобутку газу з 2015 по 2023 рік із якої слідує, що наступила стабілізація як видобутку газу, так і пластових тисків.

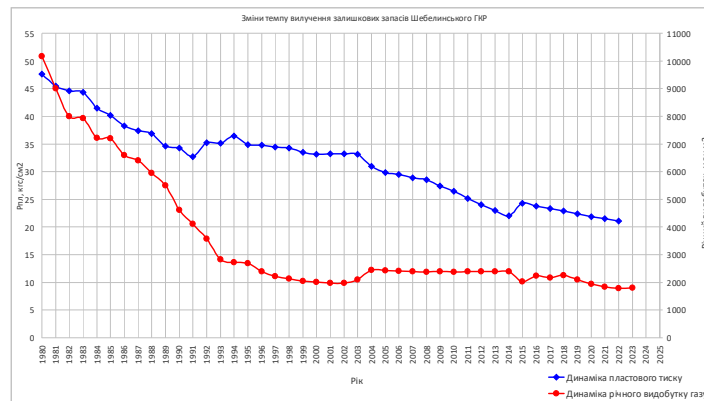


Рисунок 5 – Зміни темпу вилучення залишкових запасів газу та пластові тиски на пізній стадії розробки Шебелинського ГКР

Таблиця 4 – Стабілізація пластових тисків та об'ємів видобутку газу на пізній стадії розробки Шебелинського ГКР

Показник	Роки								
	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Видобуток газу, млн. м ³	20353	2237	2173	2253	2107	1951	1843	1790	1804
Поточний пластовий тиск, МПа	2,43	2,38	2,33	2,29	2,24	2,19	2,15	2,11	—

Слід зауважити, що в період з 2004 по 2016 рр., (що спостерігається на кривих рис. 6), річний видобуток газу знову збільшився до 2,4 млрд.м³, при цьому продовжилось падіння пластового тиску, тому що об'єм перетоків складав лише 1,8–1,9 млрд.м³ і не встигав за відбором газу за рахунок введення нових ДКС.

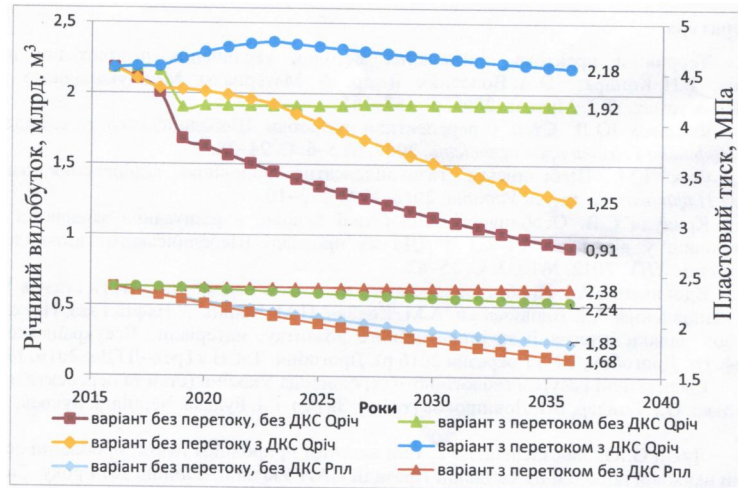


Рисунок 6 – Динаміка фактичного та прогнозного видобутку газу та пластових тисків по 4 варіантам розробки Шебелинського ГКР [3]

Це дає підстави зробити припущення, що на Шебелинському ГКР спостерігається підтримання пластового тиску за рахунок щорічного відновлення запасів газу в об'ємі 1,7–1,9 млрд.м³ за рахунок перетоків газу з глибоких горизонтів, так як всі інші фактори впливу на підтримування пластового тиску себе вичерпали.

Враховуючи вищенаведене, автором в 2018 році було розглянуто чотири варіанти подальшої розробки Шебелинського ГКР: розробка без введення в експлуатацію дотискуючої компресорної станції (ДКС) та з введенням ДКС без врахування перетоків (діючі проектні варіанти). А також врахування перетоків газу (відновлення запасів) для безкомпресорної та компресорної розробки (прогнозні авторські варіанти) [5].

Як бачимо, за виконаним прогнозом варіанти 1 і 2 і з врахуванням відновлення запасів природного газу вигідно відрізняються від діючих проектних варіантів без врахування перетоку, що забезпечує стабілізацію пластового тиску і, відповідно збільшення видобутку газу.

Однак ДКС на Шебелинському родовищі так і не була введена в експлуатацію станом на 01.01.2023, фактична розробка Шебелинського ГКР з 2016 року пішла по варіанту з урахуванням перетоку газу із глибоких горизонтів. На рис. 6 показано криві видобутку газу та пластові тиски, фактичні, в тому числі подовженні з 2016 по 2023 рік, які співпадають з прогнозом автора 2018 року.

Висновки. Таким чином, прогноз показників розробки, наведений в даній статті, є уточненням до останніх прийнятих документів розробки, і рекомендується для врахування в наступних розрахунках щодо прогнозу довгострокового видобутку газу із Шебелинського ГКР. За результатами підрахунків при безкомпресорній розробці з урахуванням перетоків газу починаючи з 2020 року спостерігається перехід в режим постійного

річного видобутку газу в об'ємах 1,7–1,9 млрд.м³. Останнє підтверджує відновлення запасів газу Шебелинського ГКР згідно теорії постійної дегазації Землі, перетоки газу і видобуток врівноважені і забезпечать довгострокову розробку Шебелинського ГКР понад 100 років.

Література

1. Фесенко Ю.Л. Стан і перспективи розробки Шебелинського газоконденсатного родовища/ Ю.Л. Фесенко, Є.О. Волосник, І.М. Фик//Нафтова і газова промисловість. – 2009, №5-6, – С. 24–28.
2. Григорьев В.С.История освоения и промышленной разработки Шебелинского газоконденсатного месторождения /В.С. Григорьев, В.И. Руднева//Питання розвитку газової промисловості України / зб. наук. праць. Вип. XXXIII, – Харків: УкрНДІгаз, 2000. – С. 24–29.
3. Кривуля С.В. Критерії дорозвідки великих родовищ вуглеводнів у Нижньопермсько-Верхньокам'яновугільних відкладах Дніпровсько-Донецької западини : монографія / С.В. Кривуля. – Х. : Ексклюзив, 2014. – 174 с.
4. Фик І.М. Відновлення запасів на Шебелинському газоконденсатному родовищі // Геологія нафти і газу: матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів (м. Харків, 19-20 квітня 2018 р.) / Гол. Ред. Колегії В.А. Пересадько. – Х.: ХНУ імені Каразіна, 2018. – С. 27–31.
5. Фик І.М. Перспективи довгострокової розробки Шебелинського газоконденсатного родовища в умовах відновлення запасів/Фик І.М., Фик М.І., Фик І.М.// Вісник Харківського Національного університету ім. В.Н.Каразіна. – 2009. – №50. –С. 63–76.
6. Фик І.М., Фик І.М. Відновлення запасів газу Шебелинського газоконденсатного родовища – запорука довгострокової розробки//Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування. Матеріали Шостої міжнародної науково-практичної конференції (7–11 жовтня 2019 р., м. Трускавець). Державна комісія України по запасах корисних копалин (ДКЗ). – Т. 1. – К.: ДКЗ, 2019. – С. 395–400.
7. Фик І.М. Експериментальне вивчення процесу зворотного просочення при падінні тиску в покладі / С.Ф. Поверенний, І.М. Фик, О.П. Варавіна, М.Я. Бурова, О.О. Яцкевич // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Хімія, хімічна технологія та екологія = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Chemistry, Chemical Technology and Ecology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (7). – С. 68–77.
8. Метод полупроницаемой мембраны в режиме «дренирования-просочения» при дослідженні нафтогазових колекторів / С.Ф. Поверенний, І.М. Фик, О.П. Варавіна, М.Я. Бурова, О.О. Яцкевич//Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2020. (4). – С. 80–86.
9. Фик І.М. Щодо можливості сайклінг-процесу на пізній стадії розробки газоконденсатних родовищ / І.М. Фик, О.П. Варавіна, Я.О. Раєвський //Геологія нафти і газу: матеріали всеукраїнської наук.-практ. конф. студ. та аспірантів, 14–15 травня 2019 р. / ред. кол. В.А. Пересадько [та ін.] ; Харків. нац. ун-т ім. В. Н. Каразіна, Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т", Укр. н.-д. ін-т природних газів. – Харків : ХНУ ім. В.Н. Каразіна, 2019. – С. 15–19.
10. Фик І.М. Геологічні критерії та методи підвищення конденсатовилучення на пізній стадії розробки газоконденсатних родовищ/ І.М. Фик, О.П. Варавіна, О.І. Хріпко

// Вісник Харківського національного університету серія «Геологія». Географія. Екологія. – 2021. – Вип. 54. – С. 117–132.

11. Фик І.М. Щодо джерела відновлення промислових запасів Шебелинського ГКР. // Геологія нафти і газу. Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів. М. Харків 26-27 листопада 2020. 20–28.

12. Чепіль П.М. Друге життя родовищ нафти і газу України – міф чи реальність // Мінеральні ресурси України.– 2008, №2. – С. 37–38.

Bibliography (transliterated)

1. Fesenko Yu.L. Stan i perspektivi rozrobki Shebelinskogo gazokondensatnogo rodovischa/ Yu.L. Fesenko, E.O. Volosnik, I.M. Fik//Naftova i gazova promislovist. – 2009, #5–6, – P. 24–28.

2. Grigorev V.S. Istoriya osvoeniya i promyishlennoy rozrobotki Shebelinskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya /V.S. Grigorev, V.I. Rudneva//Pitannya rozvitku gazovoyi promislovosti Ukrayini / zb. nauk. prats. Vip. HHIII, – Harkiv: UkrNDIgaz, 2000. – P. 24–29.

3. Krivulya S.V. Kriteriyi dorozvidki velikih rodovisch vuglevodniv u Nizhnopermsko-Verhnokam'yanovugilnih vidkladah Dniprovsko-Donetskoyi zapadini : monografiya / S.V. Krivulya. – H. : Eksklyuziv, 2014. – 174 p.

4. Fik I.M. Vidnovlennya zapasiv na Shebeliskomu gazokondensatnomu rodovischi // Geologiya nafti i gazu: materialy vseukrayinskoyi naukovoprastichnoyi konferentsiyi studentiv ta aspirantiv (m. Harkiv, 19-20 kvitnya 2018 r.) / Gol. Red. Kolegiyi V.A. Peresadko. – H.: HNU imeni Karazina, 2018. – P. 27–31.

5. Fik I.M. Perspektivi dovgostrokovoyi rozrobki Shebelinskogo gazokondensatnogo rodovischa v umovah vidnovlennya zapasiv/Fik I.M., Fik M.I., Fik I.M.// Visnik Harkivskogo Natsionalnogo universitetu im. V.N.Karazina. – 2009. – #50. –P. 63–76.

6. Fik I.M., Fik I.M. Vidnovlennya zapasiv gazu Shebelinskogo gazokondensatnogo rodovischa – zaporuka dovgostrokovoyi rozrobki//Nadrokoristuvannya v Ukrayini. Perspektivi investuvannya. Materiali Shostoyi mizhnarodnoyi naukovopraktichnoyi konferentsiyi (7–11 zhovtnya 2019 r., m. Truskavets). Derzhavna komisiya Ukrayini po zapasah korisnih kopalin (DKZ). – T. 1. – K.: DKZ, 2019. – P. 395–400.

7. Fik I.M. Eksperimentalne vivchennya protsesu zvorotnogo prosochennya pri padinni tisku v pokladi / S.F. PovErEnniy, I.M. Fik, O.P. Varavina, M.Ya. Burova, O.O. Yatskevich // Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu "HPI". Ser. : Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : Chemistry, Chemical Technology and Ecology : zb. nauk. pr. – Harkiv : NTU "HPI", 2022. – # 1 (7). – P. 68–77.

8. Metod poluproniknenoyi membrani v rezhimi «drenuvannya-prosochennya» pri doslidzhenni naftogazovih kolektoriv / S.F. PovErEnniy, I.M. Fik, O.P. Varavina, M.Ya. Burova, O.O. Yatskevich//Visnik Natsionalnogo tehnicnogo universitetu «HPI» Seriya: Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya. – 2020. (4). – P. 80–86.

9. Fik I.M. Schodo mozhlivosti saykling-protsesu na pizniy stadiyi rozrobki gazokondensatnih rodovisch / I.M. Fik, O.P. Varavina, Ya.O. RaEvskiy //Geologiya nafti i gazu: materialy vseukrayinskoyi nauk.-prakt. konf. stud. ta aspirantiv, 14–15 travnya 2019 r. / red. kol. V.A. Peresadko [ta in.] ; Harkiv. nats. un-t im. V.N. Karazina, Nats. tehn. un-t "Harkiv. politehn. in-t", Ukr. n.-d. in-t prirodniy gaziv. – Harkiv : HNU im. V.N. Karazina, 2019. – P. 15–19.

10. Fik I.M. Geologichni kriteriyi ta metodi pidvischennya kondensatoviluchennya na pizniy stadiyi rozrobki gazokondensatnih rodovisch/ I.M. Fik, O.P. Varavina, O.I. Hripko // Visnik Harkivskogo natsionalnogo universitetu seriya «Geologiya». Geografiya. Ekologiya. – 2021. – Vip. 54. – P. 117–132.

11. Fik I.M. Schodo dzherela vidnovlennya promislovih zapasiv Shebelinskogo GKR. // Geologiya nafti i gazu. Materiali vseukrayinskoyi naukovo-praktichnoyi konferentsiyi studentiv ta aspirantiv. M. Harkiv 26–27 listopada 2020. 20–28.

12. Chepil P.M. Druge zhittya rodovisch nafti i gazu Ukrayini – mif chi realnist // Mineralni resursi Ukrayini.– 2008, #2. – P. 37–38.

УДК 622.276.64; 622.245.54

I. M. Фик

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗРОБКИ ШЕБЕЛИНСЬКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА

У роботі наведено коротку геолого-промислову характеристику Шебелинського газоконденсатного родовища, зокрема: висоту газоносного покладу, площу газонасиченості, пористість, проникність колекторів, ефективну газонасичену товщину світи мідистих пісковиків та араукаритової світи. Особливістю покладів є низька проникність та газонасиченість, погіршення колекторських властивостей продуктивних носіїв пластів від нижньої частини до верхньої та від центральної до периферійної частини покладу.

Надано структурну карту покриву світи мідистих пісковиків та карту обводнення всіх продуктивних горизонтів. Показано динаміку запасів газу та пластових тисків родовища за роками, а також прогнози авторів щодо їхньої майбутньої динаміки.

Проведено підрахунок об'ємів обводнення горизонтів та загальний об'єм пластової води, що вторглася в газоносну частину родовища. Проведено аналіз обводнення та його подальших перспектив.

Виконано статистичні розрахунки залежності об'ємів обводнення від часу та від пластового тиску, що свідчать про зменшення темпів обводнення на пізній стадії розробки родовища.

Наведено геологічний розріз Шебелинського родовища, який свідчить про можливість перетоків газу через тектонічні порушення.

Проаналізовано всі фактори впливу на підтримання пластового тиску безпосередньо в межах родовища:

- обводнення законтурними водами;
- просідання поверхні;
- внутрішній водонапірний режим;
- пружність гірських порід, газу та води.

Показано, що буріння 12 глибоких свердловин в межах Шебелинського родовища не виявило нових покладів та покрівель, але підтвердило наявність газонасиченості до глибини 5,5 тисяч метрів.

Аналіз розробки родовища показав, що станом на 2023 рік спостерігається баланс між видобутком газу та його перетоками з глибоких горизонтів.

Наведено затверджені показники розробки та авторські варіанти, які підтверджуються фактичною розробкою родовища.

Зроблено висновок, що за рахунок перетоків із об'ємом видобутку 1700–1900 млн м³ родовище буде працювати ще 100 років.

Ключові слова: промислова газоносність родовища, пластовий тиск, обводнення родовища, відновлення запасів газу.

И. М. Фык

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ШЕБЕЛИНСКОГО ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

В работе приведена краткая геолого-промышленная характеристика Шебелинского газоконденсатного месторождения, в частности: высота газоносного месторождения, площадь газоносности, пористость, проницаемость коллекторов, эффективная газонасыщенная толщина свиты медистых песчаников и араукаритовой свиты. Особенностью залежей является низкая проницаемость и газонасыщенность, ухудшение коллекторских свойств продуктивных носителей пластов от нижней до верхней и от центральной до периферийной части залежи.

Предоставлена структурная карта покрова свиты медистых песчаников и карта обводнения всех продуктивных горизонтов. Показана динамика запасов газа и пластовых давлений месторождения по годам, а также прогнозы авторов относительно их будущей динамики.

Проведен подсчет объемов обводнения горизонтов и общий объем пластовой воды, вторгшейся в газоносную часть месторождения. Проведен анализ обводнения и их дальнейших перспектив.

Выполнены статистические расчеты зависимости объемов обводнения от времени и от пластового давления, свидетельствующие об уменьшении темпов обводнения на поздней стадии разработки месторождения.

Приведен геологический разрез Шебелинского месторождения, свидетельствующий о возможности перетоков газа из-за тектонических нарушений.

Проанализированы все факторы влияния на поддержание пластового давления непосредственно в пределах месторождения:

- обводнение законтурными водами;
- проседание поверхности;
- внутренний водонапорный режим;
- упругость горных пород, газа и воды.

Показано, что бурение 12 глубоких скважин в пределах Шебелинского месторождения не выявило новых залежей, но подтвердило наличие газонасыщенности до глубины 5,5 тысячи метров.

Анализ разработки месторождения показал, что на 2023 год наблюдается баланс между добычей газа и его перетоками из глубоких горизонтов.

Приведены утвержденные показатели разработки и авторские варианты, подтверждаемые фактической разработкой месторождения.

Заключен, что за счет перетоков с объемом добычи 1700–1900 млн м³ месторождение будет работать еще 100 лет.

Ключевые слова: промышленная газоносность месторождения, пластовое давление, обводнение месторождения, восстановление запасов газа.

I. M. Fyk

**PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE SHEBELYN GAS
CONDENSATE FIELD**

The paper provides a brief geological and industrial characterization of the Shebelinsky gas-condensate field, including the height of the gas-bearing layer, the area of gas occurrence, porosity, permeability of collectors, effective gas-saturated thickness of the coppery sandstones, and araucarite strata. The peculiarity of the deposits lies in the low permeability and gas saturation, deterioration of collector properties of productive reservoirs from the lower to the upper and from the central to the peripheral part of the deposit. A structural map of the cover of coppery sandstones and a map of water saturation of all productive horizons are presented. The dynamics of gas reserves and reservoir pressures of the field over the years are shown, along with the authors; forecasts for their future dynamics.

Calculations of the volumes of water saturation of horizons and the total volume of reservoir water that has invaded the gas-bearing part of the field have been conducted. An analysis of water saturation and its future prospects has been carried out.

Statistical calculations of the dependence of water saturation volumes on time and reservoir pressure have been performed, indicating a decrease in the rates of water saturation at the late stage of field development.

A geological section of the Shebelinsky field is presented, indicating the possibility of gas migration through tectonic faults.

All factors influencing the maintenance of reservoir pressure within the deposit have been analyzed, including:

- contour water flooding;
- surface subsidence;
- internal waterdrive regime;
- the elasticity of rock formations, gas, and water.

It is shown that drilling 12 deep wells within the Shebelinsky field did not reveal new deposits or caps but confirmed the presence of gas saturation to a depth of 5.5 thousand meters.

The analysis of field development indicates a balance between gas production and its migration from deep horizons as of the year 2023.

Approved development indicators and author's options are provided, supported by actual field development.

The conclusion is drawn that, due to migration with a volume of production of 1700–1900 million m³, the field will operate for another 100 years.

Keywords: industrial gas carrying capacity of the field, reservoir pressure, irrigation of the field, recovery of gas reserves.

А. В. Щербина

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ
ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ НА ПРИКЛАДІ
ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ
ПРИОСЬОВОЇ ЗОНИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ***Український науково-дослідний інститут природних газів, (УкрНДІгаз)***Ключові слова:** свердловина, газ, експлуатація, дебіт, темп розробки.

Вступ. На сьогодні Україна є енергонезалежною державою, розвиток газовидобувної галузі України з урахуванням провідного досвіту світових лідерів передбачає збільшення обсягів власного видобутку природного газу з метою зменшення її залежності від імпорту енергоносіїв [1, 13, 14]. З наявною значною ресурсною базою та критичною необхідністю забезпечення населення і бізнесу зменшення обсягів видобутку є неприпустимим, отже залишається актуальним питання збільшення темпу розробки існуючих родовищ [7, 11]. Основними методами досягнення необхідного результату для країни є буріння нових свердловин, застосування методів інтенсифікації та вдосконалення систем розробки [8–10]. З метою стабілізації та збільшення обсягів видобутку необхідно досліджувати вплив та ефективність проведених заходів на родовищах які показали позитивні результати, щоб в подальшому відтворити підходи на родовищах-аналогах.

Зараз в галузі залишається проблема підбору та впровадження ефективних систем розробки, за рахунок яких можна в мінімальні терміни досягти збільшення обсягів видобутку вуглеводнів [2]. Проблема ускладнена відсутністю достатньої кількості якісної геолого-промислової інформації та гідродинамічних досліджень в процесі проектування систем розробки. Шляхом аналізу історії розробки родовищ, на яких впроваджено оптимальні системи розробки, необхідно визначити та описати застосовані підходи збільшення темпів вилучення запасів вуглеводнів, з метою впровадження рекомендацій на інших газоконденсатних родовищах України.

Збільшення дебіту свердловини або відновлення її видобувних можливостей залежить від методів інтенсифікації припливу вуглеводнів [3–5]. Технологія гідравлічного розриву пласта є однією з найефективніших на сьогодні [6, 12, 15], а тому широко застосовуваною для підвищення продуктивності свердловин. Оцінка результативності цього заходу досить часто зводиться до порівняння дебіту до та після проведення, але важливо розуміти загальний ефект для системи розробки від всіх проведених операцій.

Мета роботи полягає в дослідженні впливу та ефективності проведених комплексних геолого-технологічних заходів на систему розробки газоконденсатного родовища центральної частини приосьової зони Дніпровсько-Донецької западини.

Завдання: виконати аналіз розробки газоконденсатного родовища, кількісно оцінити операції та заходи, проведені з метою збільшення відборів, провести порівняльний аналіз динаміки зміни темпу розробки родовища, річних відборів, продуктивностей свердловин та заходів які на це вплинули.

Наукова новизна: система розробки досліджуваного родовища є унікальною завдяки проведеним гідравлічним-розривам на свердловинах експлуатаційного об'єкту, які дали найбільший ефект у відносних значеннях у порівнянні з іншими родовищами.

Операція застосовувалася майже до всього експлуатаційного фонду свердловин досліджуваного об'єкту, тому оцінка його дієвості доступними методами є новим напрямком визначення ефекту впровадження високоефективних систем розробки.

Матеріали та методи. Проведено дослідження розробки експлуатаційного об'єкту газоконденсатного родовища у період 2015–2022 років. В період з 2017 по 2021 роки річні відбори суттєво збільшились за рахунок проведення геолого технологічних заходів, тому постала необхідність дослідити та оцінити отриманий ефект. В геологічній будові родовища приймають участь відклади палеозойської, мезозойської та кайнозойської ератем. Колектори досліджуваного об'єкту представлені теригенними утвореннями, в основному пісковиками, рідше алевролітами з середньою відкритою пористістю 9 %. Початковий пластовий тиск 50 МПа, пластовий тиск станом на 2015 р. становить 30–35 МПа, станом на 2015 р. накопичений видобуток по експлуатаційному об'єкту 25 % від початкових запасів вуглеводнів.

Матеріалами для досліджень є геолого-промислові дані та геолого-технологічна модель родовища.

В роботі застосовано методи емпіричного дослідження, а саме порівняння та вимірювання та теоретичного – аналіз.

Результати та обговорення. Станом на 01.01.2015 об'єкт розроблявся 18 свердловинами, до 01.01.2017 ця кількість зростає до 24. Основний ефект приросту річних відборів отримано за рахунок переведення свердловин з іншого експлуатаційного об'єкту, буріння нових свердловин та проведення гідравлічного розриву пласта на експлуатаційному фонді.

Загалом на експлуатаційному об'єкті проведено 50 геолого-технологічних заходів, 45 з яких в 2017–2020 роках, дані кількості проведених заходів у відповідний рік наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Кількість проведення геолого технологічних заходів по роках

Геолого-технологічні заходи/Роки	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Переведення	1	1	1	1	4	13	0
Буріння	1	2	1	0	0	0	0
Гідравлічний розрив пласта	0	0	11	6	4	4	0

У 2017 році після проведення заходів з інтенсифікації спостерігалось збільшення дебіту у 2.3–14 раз; 2018 – 2.1–5.8; 2020 – 1.3–5.1. У 2019 році гідравлічний розрив пласта проводився одночасно з переведенням свердловин на досліджуваний експлуатаційний об'єкт, тому збільшення дебіту не визначається. У відносних значеннях найкращий результат отримано по свердловині X, а саме збільшення дебіту у 14 раз, в абсолютних значеннях найбільший приріст дебіту та його значення по свердловині Y (рис. 1).

У 2019 році гідравлічний розрив пласта проводився одночасно з переведенням свердловин на досліджуваний експлуатаційний об'єкт, тому оцінювати ефект інтенсифікації в порівнянні з експлуатацією з іншого горизонту недоцільно. На одній зі свердловин проводилося повторна операція гідравлічного розриву пласта, ефект від якої був незначним з технічних причин та через виснаження пластової енергії в зоні свердловини.

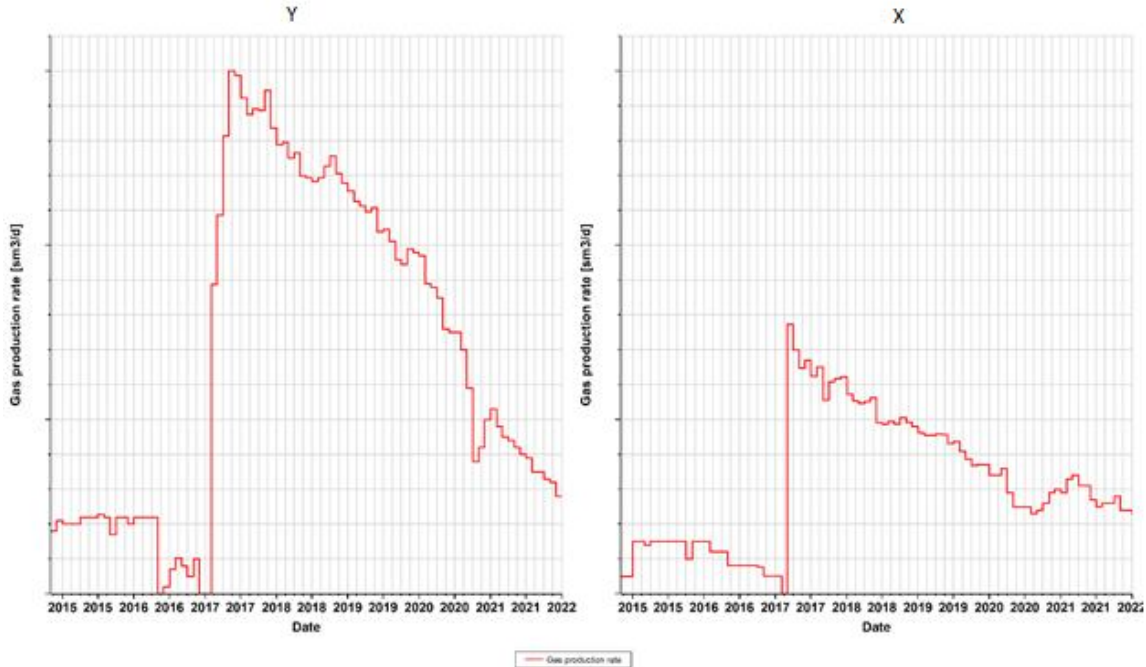


Рисунок 1 – Графік зміни добових відборів свердловин Y та X в часі

Завдяки проведеним заходам у 2017 році кратно збільшився видобуток газу, у порівнянні з попереднім роком в два рази при збільшенні фонду на 2 свердловини та проведенні 11 гідравлічних розривів пласта з додатковою перфорацією, в подальшому значення темпу річних відборів та дебіт середньої свердловини зростали до 2019 року і досягли значень 7.9 % та 61.6 тис м³/добу відповідно (табл. 2, рис. 2).

Таблиця 2 – Зміна темпу відбору та дебіту середньої свердловини по роках

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Темп відбору, %	2.52	2.58	5.18	6.3	7.9	7.27	6.83
Дебіт середньої свердловини, тис м ³ /добу	33.6	25.9	50.7	58.7	61.6	49	53.8
Кількість свердловин	20	23	25	26	31	34	34

Ефект від проведених операцій наглядно фіксується на рисунку 3, та залежить від кількості проведених операцій. Як видно з графіку ефект від проведених геолого-технологічних заходів відтворюється в три етапи, перший та другий етапи тривають по 18 місяців, третій – 15 і відбувається плавне падіння добових відборів зумовлене поступовим виснаженням пластової енергії покладу.

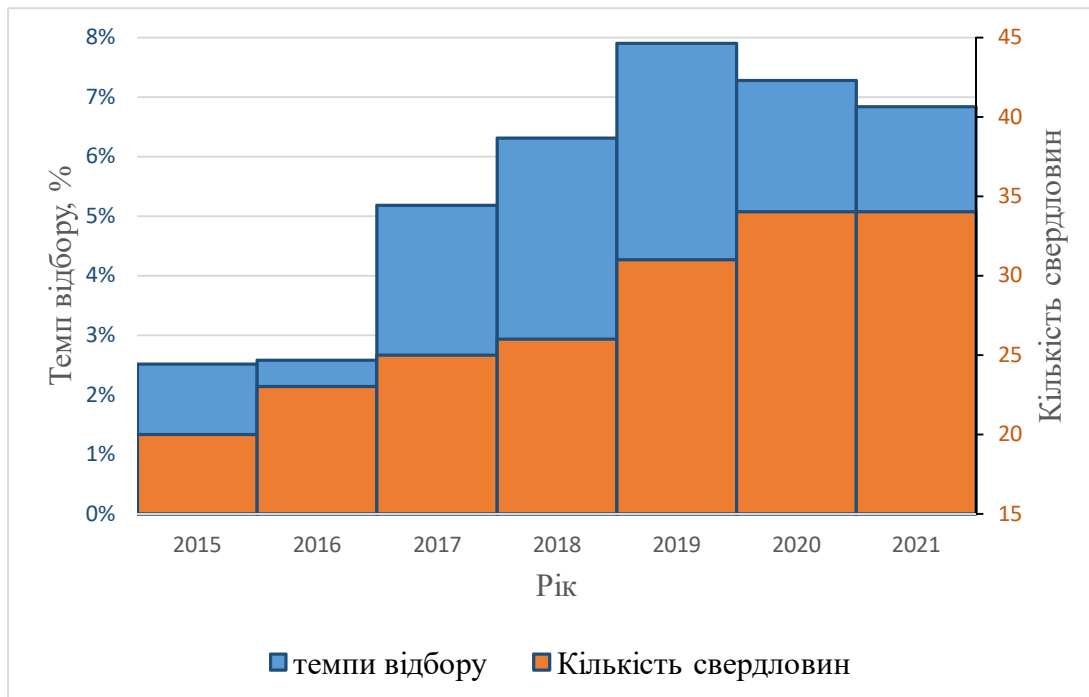


Рисунок 2 – Зміна темпу відбору газу та кількості свердловин по експлуатаційному об’єкту в часі

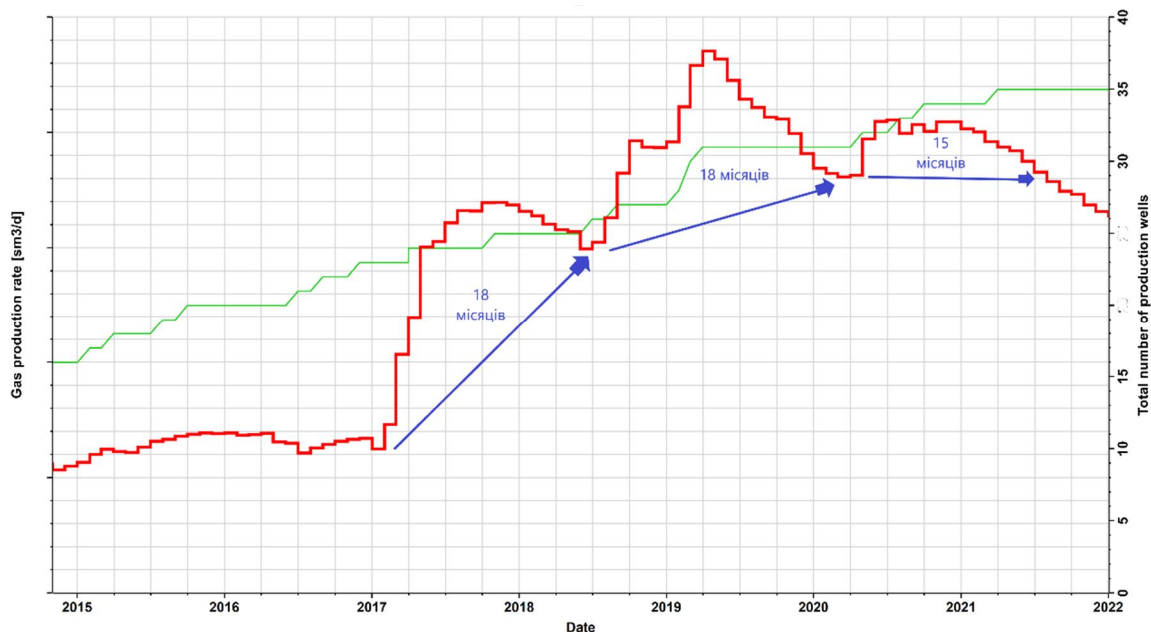


Рисунок 3 – Зміна темпу добового відбору газу та кількості видобувних свердловин по експлуатаційному об’єкту в часі

На третьому етапі проведено найбільшу кількість геолого-технологічних заходів, але відбори суттєво не зростають, це пов’язано зі зменшенням пластової енергії, відповідно, заходи забезпечують утримання видобутку на певному рівні, що відповідає середньому за час максимально ефективної розробки (рис. 4).

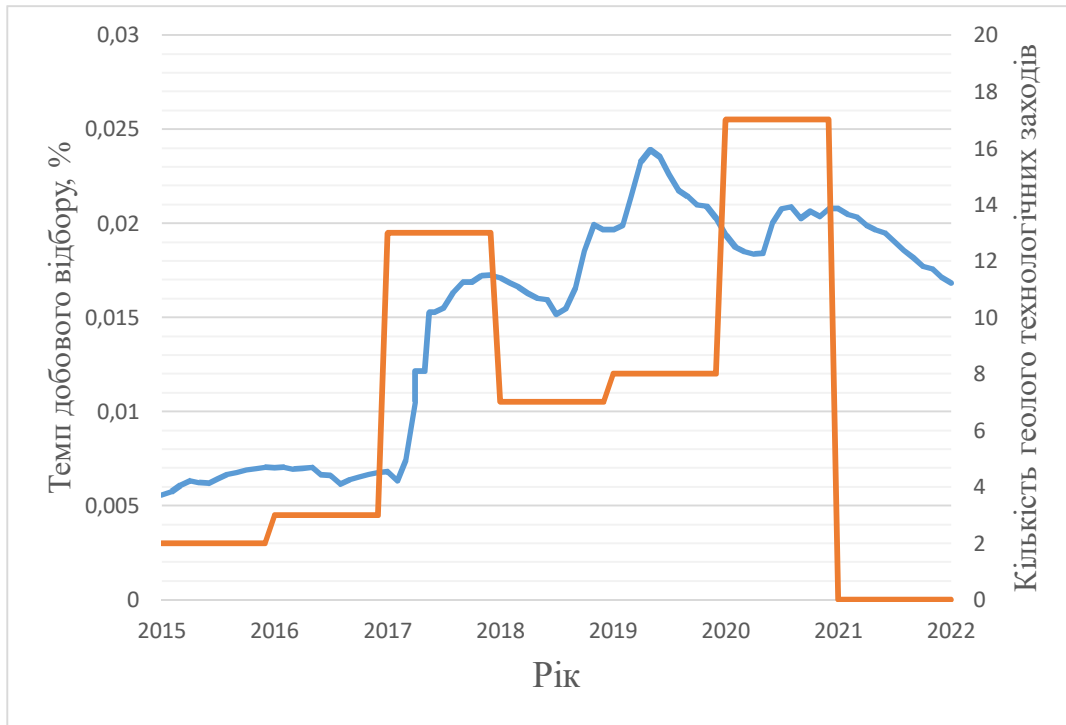


Рисунок 4 – Зміна темпу добового відбору газу та кількості проведених геолого-технологічних заходів по експлуатаційному об’єкту в часі

Обмежуючими факторами є робочий тиск на усті свердловин, мінімальне значення якого на даний час складає 2,2 МПа (тиск на виході з УКПГ 2,0–2,5 МПа). В подальшому, за рахунок будівництва газопроводу, тиски на виході з УКПГ можуть знизитись до 1,5–1,0 МПа. Враховуючи фактичну продуктивність свердловин родовища, а також недоцільність різкого зниження робочих тисків свердловин, в яких виконувався гідравлічний розрив пласта, на зниження робочих тисків на 0,3–0,4 МПа відреагують лише низьконапірні свердловини, що не дасть суттєвого приросту добового відбору газу, але забезпечить досягнення максимальних економічно обґрунтованих кінцевих коефіцієнтів вилучення вуглеводнів.

Оцінка впливу кожного із заходів окремо постає окремим напрямком для дослідження, оскільки між проведення перфорації та гідравлічним розривом пласта гідродинамічні дослідження свердловини не проводилися. Визначивши частку методу інтенсифікації як самостійного заходу з’явиться можливість аналізувати його ефективність та доцільність на досліджуваному об’єкті.

Висновки. Шляхом впровадження геолого-технологічних заходів досягнуто збільшення темпу розробки родовища більш ніж у три рази, а саме з 2,58 % у 2015 році до 7,9 % у 2019 році, середня тривалість ефекту від застосованих геолого-технологічних заходів становить 18 місяців.

Основним рушієм збільшення відборів є проведення гідравлічного розриву пласта на нових свердловинах та існуючому фонді. Середнє збільшення дебіту свердловин після проведення інтенсифікації становить 425 %.

В період 2017–2021, за рахунок впровадження вискоелективної системи розробки з застосуванням гідравлічного розриву пласта, видобуто від початкових запасів на 7,8 % більше ніж за попередній 21 рік розробки.

Рекомендовано дослідження подібних за геологічною будовою та параметрами родовищ темп розробки яких становить менше 5 % та накопичений видобуток вуглеводнів складає менше 30 % від початкових запасів з метою відтворення досліджуваного ефекту.

Література

1. Домбровська Т.М. Перспективи відновлення енергетичного сектору України на засадах сталого розвитку // Східна Європа: економіка, бізнес та управління. – 2023. – № 39 – С. 3–9.
2. Матківський С.В. Перспективи підвищення ефективності розробки нафтогазових родовищ України з використанням цифрового моделювання, XII Міжнародна науково-практична конференція «Actual priorities of modern science, education and practice», 29 березня – 01 квітня 2022 р., Париж, Франція, – 2022. – С. 836–839.
3. Qun LEI Progress and development directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs / Qun LEI, Yun XU, Zhanwei YANG, Bo CAI, Xin WANG, Lang ZHOU, Huifeng LIU, Minjie XU, Liwei WANG, Shuai Li // Petroleum Exploration and Development, – 202148(1), – P. 221–231.
4. Вдовиченко А.І. Передові технології інтенсифікації нафтогазовидобутку в Україні. Економічний розвиток: теорія, методологія, управління // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Будапешт–Прага–Київ.- –2015.– С. 74–79.
5. Зезекало І.Г. Проблеми використання пневморозриву для інтенсифікації видобутку вуглеводневої сировини на газоконденсатних родовищах України / Зезекало І.Г., Думенко Г.А // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Хімія, хімічна технологія та екологія. – Харків : НТУ "ХПІ", – 2021. – № 1 (5). – С. 32–37.
6. Файфер О.В. Аналіз ефективності проведення гідророзриву пласта на родовищах Дніпровсько-Донецької западини / Файфер О.В., Продайко Г.А. // Нафтогазова енергетика 2017 : тези доп. міжнар. наук.-техн. конф., м. Ів.-Франківськ, 15–19 трав. – Івано-Франківськ – 2017. – С. 327–329.
7. Єгер Д.О. Проблеми та перспективи стабілізації і нарощування видобутку природного газу в Україні / Єгер Д.О., Лещенко І.Ч., Гришаненко В.П. // Проблеми загальної енергетики – 2019. – №1. – С. 4–11.
8. Про затвердження Правил розробки нафтових і газових родовищ: Наказ М-ва екології та природ. ресурсів України від 15.03.2017 р. № 118 : станом на 2 черв. 2023 р.
9. Кондрат Р. М. Технологія розробки газових і газоконденсатних родовищ: підручник. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2021. 471 с.
10. Кондрат Р.М. Удосконалення технологій дорозробки виснажених газових покладів. / Кондрат Р.М., Кондрат, О.Р., Хайдарова, Л.І. // Prospecting and Development of Oil and Gas Fields, – 2022. – №2(83), – P. 26–36.
11. Дорошенко В.М. Основні напрями вдосконалення систем розробки родовищ та потенціал нарощування видобутку нафти в Україні / Дорошенко В.М., Зарубін Ю.О., Гришаненко В.П., Прокопів В.Й., Швидкий О.А. // Нафтогазова галузь України, – 2013. – №2, – С. 27–30.
12. Iqbal M.I. Hydraulic Fracturing. / Iqbal M.I., Khan S. // Coiled Tubing and Other Stimulation Techniques. New York, – 2022. – P. 147–289.
13. Лукін О.Ю. Забезпечення України власним природним газом: проблемні аспекти (за матеріалами наукової доповіді на засіданні Президії НАН України 2 липня 2014 р.). // Вісник Національної академії наук України, – 2014. – №9, – С. 16–22.

14. Вдовиченко А.І. Перспективи забезпечення України газом власного видобутку // Матеріали міжнародної конференції «Форум гірників – 2015», 30 вересня–3 жовтня 2015 р., м. Дніпропетровськ. – 2015. – Т.1. – С. 38–42.

15. Yuan, B. Stimulation and hydraulic fracturing technology in natural gas reservoirs: Theory and case studies (2012–2015) / Yuan, B., Wood, D.A., Yu, W. // Journal of Natural Gas Science and Engineering, – 2015. – №26, – P. 1414–1421.

Bibliography (transliterated)

1. Dombrovska T.M. Perspektyvy vidnovlennia enerhetychnoho sektoru Ukrainy na zasadakh staloho rozvytku // Skhidna Yevropa: ekonomika, biznes ta upravlinnia. – 2023. – № 39 – P. 3-9.

2. Matkivskiy S.V. Perspektyvy pidvyshchennia efektyvnosti rozrobky naftohazovykh rodovyshch Ukrainy z vykorystanniam tsyfrovoho modeliuvannia, XII Mizhnarodna naukovopraktychna konferentsiia «Actual priorities of modern science, education and practice», 29 bereznia – 01 kvitnia 2022 r., Paryzh, Frantsiia, – 2022. – P. 836–839.

3. Qun LEI Progress and development directions of stimulation techniques for ultra-deep oil and gas reservoirs / Qun LEI, Yun XU, Zhanwei YANG, Bo CAI, Xin WANG, Lang ZHOU, Huifeng LIU, Minjie XU, Liwei WANG, Shuai Li // Petroleum Exploration and Development, – 202148(1), – P. 221–231.

4. Vdovychenko A.I. Peredovi tekhnolohii intensyfikatsii naftohazovydobutku v Ukraini. Ekonomichnyi rozvytok: teoriia, metodolohiia, upravlinnia // Materialy III Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii. Budapesht–Praha–Kyiv. –2015.–P. 74–79.

5. Zezekalo I.H. Problemy vykorystannia pnevmorozryvu dlia intensyfikatsii vydobutku vuhlevodnevoi syrovyny na hazokondensatnykh rodovyshchakh Ukrainy / Zezekalo I.H., Dume-nko H.A // Visnyk Natsionalnogo tekhnichnogo universytetu "KhPI". Ser. : Khimiia, khimichna tekhnolohiia ta ekolohiia. – Kharkiv : NTU "KhPI", – 2021. – № 1 (5). – P. 32–37.

6. Faifer, O.V. Analiz efektyvnosti provedennia hidrorozryvu plasta na rodovyshchakh Dniprovsko-Donetskoï zapadyny / Faifer O.V., Prodaiko H.A. // Naftohazova enerhetyka 2017 : tezy dop. mizhnar. nauk.-tekhn. konf., m. Iv.-Frankivsk, 15–19 trav. - Ivano-Frankivsk – 2017. – P. 327–329.

7. Yeher D.O. Problemy ta perspektyvy stabilizatsii i naroshchuvannia vydobutku pryrodno-ho hazu v Ukraini / Yeher D.O., I. Ch. Leshchenko, V. P. Hryshanenko // Problemy zahalnoi enerhetyky – 2019. – №1. – P. 4–11.

8. Pro zatverdzhennia Pravyl rozrobky naftovykh i hazovykh rodovyshch : Nakaz M-va ekolohii ta pryrod. resursiv Ukrainy vid 15.03.2017 r. № 118 : stanom na 2 cherv. 2023 r.

9. Kondrat R.M. Tekhnolohiia rozrobky hazovykh i hazokondensatnykh rodovyshch:pidruchnyk. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH, 2021. 471 p.

10. Kondrat R.M. Udoskonalennia tekhnolohii dorozrobky vysnazhenykh hazovykh pokladiv. / Kondrat R.M., Kondrat, O.R., Khaidarova, L.I. // Prospecting and Development of Oil and Gas Fields, – 2022. – №2(83), – P. 26–36.

11. Doroshenko V.M.Osnovni napriamy vdoskonalennia system rozrobky rodovyshch ta po-tentsial naroshchuvannia vydobutku nafty v Ukraini / Doroshenko V.M., Zarubin Yu.O., Hryshanenko V.P., Prokopiv V.I., Shvydkyi O.A. // Naftohazova haluz Ukrainy, – 2013. – №2, – P. 27–30.

12. Iqbal M.I. Hydraulic Fracturing. / Iqbal M.I., Khan S. // Coiled Tubing and Other Stimulation Techniques. New York, – 2022. – P. 147–289.

13. Lukin, O.Yu. Zabezpechennia Ukrainy vlasnym pryrodnyim hazom: problemni aspekty (za materialamy naukovoї dopovidi na zasidanni Prezydii NAN Ukrainy 2 lypnia 2014 r.). // Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, – 2014. – №9, – P. 16–22.

14. Vdovychenko A.I. Perspektyvy zabezpechennia Ukrainy hazom vlasnoho vydobutku // Materialy mizhnarodnoi konferentsii «Forum hirnykiv – 2015», 30 veresnia–3 zhovtnia 2015 r., m. Dnipropetrovsk. – 2015. – Т.1. – P. 38–42.

15. Yuan, B. Stimulation and hydraulic fracturing technology in natural gas reservoirs: Theory and case studies (2012–2015) / Yuan, B., Wood, D.A., Yu, W. // Journal of Natural Gas Science and Engineering, – 2015. – №26, – P. 1414–1421.

УДК 622.279.5

А. В. Щербина

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ КОМПЛЕКСНИХ
ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ НА ПРИКЛАДІ
ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО РОДОВИЩА ЦЕНТРАЛЬНОЇ ЧАСТИНИ
ПРИОСЬОВОЇ ЗОНИ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ**

Система розробки родовища є основою видобування вуглеводнів, оскільки вона забезпечує досягнення необхідних техніко-економічних показників. Тому високоефективна система розробки є необхідною для забезпечення максимального прибутку в мінімальні терміни. Для пошуку методів вдосконалення існуючих систем розробки газових та газоконденсатних родовищ, збільшення темпів відбору газу проведено емпіричні дослідження, аналіз та оцінка ефекту від впровадження комплексу геолого-технологічних заходів на експлуатаційному об'єкті газоконденсатного родовища центральної частини приосьової зони Дніпровсько-Донецької западини. Показано, що за рахунок проведення гідравлічних розривів пласта, буріння та переведення свердловин на експлуатаційний об'єкт протягом п'яти років розробки видобуто газу на 7,8 % більше ніж за попередні 21 рік, темп розробки родовища з 2015 по 2019 зріс з 2,52 % до 7,9 %, дебіт середньої свердловини зріс на 83% при збільшенні експлуатаційного фонду на 55 %. Результати досліджень ефекту від застосування геолого-технологічних заходів зображено у вигляді графічних залежностей зміни темпу відбору від кількості експлуатаційних свердловин в часі, темпу добового відбору газу від кількості проведених геолого-технологічних заходів по досліджуваному експлуатаційному об'єкті в часі. Визначено, що основним рушієм збільшення відборів газу є проведення гідравлічного розриву пласта по більшій частині експлуатаційного фонду свердловин, завдяки якому середнє збільшення дебіту свердловин становить 425 %. За результатами обробки геолого-промислових даних та аналізу зміни темпу добового відбору газу в часі ефект від проведених операцій поділено на три часові відрізки тривалістю 15–18 місяців. Зменшення тривалості ефекту від збільшення фонду експлуатаційних свердловин та проведення гідравлічного розриву пласта зумовлена падінням обсягів пластової енергії, тому досліджуваний комплекс заходів матиме найбільший ефект при впровадженні на початковому етапі розробки подібного за геологічними параметрами покладу.

Ключові слова: свердловина, газ, експлуатація, дебіт, темп розробки.

А. В. Щербина

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ГЕОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ НА ПРИМЕРЕ ГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ ПРИОСЕВОЙ ЗОНЫ ДНЕПРОВСКО-ДОНЕЦКОЙ ВПАДИНЫ

Система разработки месторождения является основой добычи углеводородов, поскольку обеспечивает достижение необходимых технико-экономических показателей. Поэтому высокоэффективная система разработки является необходимой для обеспечения максимальной прибыли в минимальные сроки. Для поиска методов совершенствования существующих систем разработки газо- и газоконденсатных месторождений, увеличения темпов отбора газа проведены эмпирические исследования, анализ и оценка эффекта от внедрения комплекса геолого-технологических мероприятий на эксплуатационном объекте газоконденсатного месторождения центральной части приосевой зоны Днепровско-Донецкой впадины. Показано, что за счет проведения гидравлических разрывов пласта, бурения и перевода скважин на эксплуатационный объект в течение пяти лет разработки добытого газа на 7,8 % больше, чем за предыдущие 21 год, темп разработки месторождения с 2015 по 2019 вырос с 2,52 % до 7,9 % дебит средней скважины вырос на 83 % при увеличении эксплуатационного фонда на 55 %. Результаты исследований эффекта от применения геолого-технологических мероприятий изображены в виде графических зависимостей изменения темпа отбора от количества эксплуатационных скважин во времени, темпа суточного отбора газа от количества проведенных геолого-технологических мероприятий по исследуемому эксплуатационному объекту во времени. Определено, что основным двигателем увеличения отборов газа является проведение гидравлического разрыва пласта по большей части эксплуатационного фонда скважин, благодаря которому среднее увеличение дебита скважин составляет 425 %. По результатам обработки геолого-промышленных данных и анализа изменения темпа суточного отбора газа во времени эффект от проведенных операций разделен на три временных отрезка продолжительностью 15–18 месяцев. Уменьшение продолжительности эффекта от увеличения фонда эксплуатационных скважин и проведение гидравлического разрыва пласта обусловлено падением объемов пластовой энергии, поэтому исследуемый комплекс мер будет иметь наибольший эффект при внедрении на начальном этапе разработки подобного по геологическим параметрам залежи.

Ключевые слова: скважина, газ, эксплуатация, дебит, темп разработки.

A. V. Shcherbyna

**STUDY OF THE EFFECTIVENESS OF THE APPLICATION OF COMPLEX
GEOLOGICAL AND TECHNOLOGICAL MEASURES ON THE EXAMPLE OF
GAS-CONDENSATE GENERATION IN THE CENTRAL PART OF THE PERIAXIAL
ZONE OF THE DNIPROV-DNETZ BASIN**

The field development system is the basis of hydrocarbon production, as it ensures the achievement of the necessary technical and economic indicators. Therefore, a high-performance development system is necessary to ensure maximum profit in the shortest possible time. Empirical studies, analysis and assessment of the effect of implementing a complex of geological and technological measures on the operational facility of a gas condensate field in the central part of the peri-axial zone of the Dnieper-Donets Basin were carried out in order to find methods for improving the existing gas and gas condensate field development systems and increasing gas extraction rates. It is shown that due to hydraulic fracturing, drilling and transfer of wells to the production facility during the five years of production of the produced gas, it is 7.8 % more than in the previous 21 hours, the rate of development of the field from 2015 to 2019 increased from 2.52 % to 7.9 %, the average well yield increased by 83 % with an increase in the operational fund by 55 %. The results of studies of the effect of the application of geological-technological measures are shown in the form of graphical dependences of the change in the rate of sampling on the number of production wells over time, the rate of daily gas sampling on the number of conducted geological-technological measures on the researched operational object over time. It has been determined that the main driver of the increase in gas production is the hydraulic fracturing of the formation in most of the operational wells, thanks to which the average increase in the output of the wells is 425 %. According to the results of geological and industrial data processing and analysis of changes in the rate of daily gas extraction over time, the effect of the performed operations is divided into three time segments lasting 15–18 months. The decrease in the duration of the effect from the increase in the fund of production wells and the conduct of hydraulic fracturing of the reservoir is due to the decrease in the volume of reservoir energy, therefore the investigated complex of measures will have the greatest effect when implemented at the initial stage of the development of a reservoir with similar geological parameters.

Keywords: well, gas, operation, flow rate, development rate.

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, проф., І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
О. О. Голубенко¹, аспірант, П. Ю. Сердечний¹, аспірант, Н. А. Яркова¹, магістр

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШКОЛИ З ВРАХУВАННЯМ ЛОКАЛЬНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

²Інститут технічної теплофізики НАН України

³Інститут загальної енергетики НАН України

Ключові слова: енергоефективність, опалення, вентиляція, тепловий насос, сонячна панель, DesignBuilder, EnergyPlus.

Вступ. Збереження енергії залишається дуже важливою задачею для нашої країни. У зв'язку з тим, що енергетична галузь зазнала великих втрат у минулі роки, питання енергоефективності стає не тільки питанням збереження грошей або догляду за навколишнім середовищем, але, певним чином, питанням виживання країни в складних обставинах.

Тема енергоефективності добре вивчена з різних боків. У своїй роботі [1] автори досліджують економічну ефективність використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), таких як сонячні панелі, вітряні турбіни, біогазові установки і т.д., в освітніх установках. Розроблена математична модель для оцінки витрат та доходів від впровадження ВДЕ, враховують такі фактори як потреба в електроенергії, тарифи, субсидії, амортизація, екологічні збитки і т.д. Також автори порівнюють різні варіанти фінансування ВДЕ, такі як власні кошти, кредити, лізинг, енергосервіс і т.д. [1].

Робота [2] присвячена дослідженню енергоефективності переривчастих режимів опалення будівель з різними теплофізичними характеристиками огорожувальних конструкцій. Автори використовують квазістаціонарний та динамічний методи для розрахунку температурних полів та теплових потоків в огорожувальних конструкціях та приміщеннях. Автори також порівнюють енергоспоживання та температурний комфорт для різних типів будівель, таких як житлові, адміністративні, громадські, за застосуванням переривчастих режимів опалення. Відсоток економії становить від 8 % до 25 % в залежності від режиму, типу будівлі та періоду року [2].

Наразі актуальним питанням залишається комплексне дослідження майже безоплатних заходів з енергозбереження таких як переривчасті режими опалення, а також заходи для можливості автономного забезпечення будівлі енергією, тобто використання ВДЕ.

Незважаючи на те, що лівова частка споживання енергії припадає на житловий сектор будівель, і саме цій групі споживачів приділяється найбільше уваги в дослідженнях, проте, саме регулювання режимів експлуатації в житловій будівлі має значні обмеження. Ці обмеження, найчастіше, викликані індивідуальними поведінковими особливостями, а також нерегулярністю присутності та відсутності людей. Наприклад, згідно [3] житлові приміщення симулюються за постійним рівнем опалення, рівномірною присутністю людей в приміщеннях та використанням електрообладнання.

Організувати енергозберігаючі режими опалення для бюджетних установ, зокрема освітніх закладів, набагато простіше, ніж для житлових споживачів. Це підтверджується деякими особливостями функціонування цієї категорії споживачів, такими як: стандартні графіки роботи та можливість контролювати наявність людей в різних приміщеннях або будівлях.

З цієї позиції, цікавим предметом дослідження може бути шкільна установа, оскільки, крім вищезгаданих особливостей в школах також: більшу частину часу присутня велика кількість людей, розклад навчання (тобто перебування людей в приміщеннях) заздалегідь відомий для кожного робочого дня, в будівлі перебуває багато дітей – група користувачів дуже вразлива до зниження температури в приміщеннях.

Враховуючи це, а також поширену недостатність фінансування освітньої галузі в країні, раціональне використання систем опалення може бути ефективним та недорогим способом енергозбереження.

Крім того, в майбутньому в рамках реалізації концепції з будівлями з мінімальним споживанням енергії, встановлення періодичних режимів роботи систем опалення, з використанням відновлюваних джерел енергії, допоможе досягти цілей зі зниження впливу на навколишнє середовище.

Мета та завдання. Метою роботи є аналіз ефективності впровадження в систему опалення школи відновлювальних джерел енергії з попередніми термомодернізацією огорожених конструкцій та введенням переривчастих режимів опалення і вентиляції за допомогою динамічного моделювання для двох кліматичних зон України.

Для досягнення поставленої мети були виконані наступні завдання:

- 1) Створення математичної моделі у програмному середовищі DesignBuilder;
- 2) Верифікація та тестування моделі;
- 3) Дослідження впливу термоса нації на енергоспоживання будівлі
- 4) Дослідження ефективності переривчастих режимів на опалення та вентиляцію;
- 5) Дослідження ефективності впровадження ВДЕ.

Матеріал і результати досліджень

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є імітаційна модель школи, яка базується на даних реальної будівлі СЗШ, поміщена в кліматичні умови м. Київ та м. Одеса, оскільки ці міста є репрезентативними представниками I та II кліматичних зон України згідно з Будівельною кліматологією [4].

Існуючий стан огорожень:

Стіни будівлі несучі зроблені з керамічної цегли на цементно-піщаному розчині. Стіна має товщину – 510 мм (кладка в дві цеглини). Зовнішні стіни утеплені мінеральною ватою товщиною 100мм, оштукатурені та пофарбовані з двох боків. Зовнішні стіни будівлі – у задовільному стані. Приведений опір теплопередачі $2,91 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Вікна займають площу $323,6 \text{ м}^2$ (коефіцієнт скління фасаду становить 0,195). Вікна двох видів металопластикові енергозберігаючі з подвійним склінням та металопластикові двокамерні. Приведений опір теплопередачі віконних блоків складає $0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Двері головного входу металопластикові заклені двокамерним склопакетом. На дверях є дотягувачі. Двері додаткових входів металопластикові. Приведений опір теплопередачі $0,61 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Дах-шатровий, з неопалювальним горищем. Покрівля – з шиферу і металочерепиці на дерев'яній кроквяній конструкції і риштуванню, без утеплення. Покрівля – у задовільному стані.

Перекриття під неопалювальним горищем залізобетонне без утеплення. Приведений опір теплопередачі складає $0,71 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Частина будівлі має неопалювальний підвал. В підвалі розташовано розведення трубопроводів систем опалення, холодного водопостачання, каналізації. Перекриття підвалу зроблене з залізобетонних плит, бетонної заливки та керамічної плитки. Приведений опір теплопередачі перекриття над неопалюваним підвалом складає $0,34 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, що не відповідає мінімальним нормативним вимогам [5].

Фундамент стрічковий з фундаментних блоків, основою підлоги по ґрунту є піщано-щебенева підсіпка, по ній бетонна стяжка, гідроізоляція, цементно-піщана стяжка.

Частина першого поверху має підлогу по ґрунту. Основою підлоги по ґрунту є піщано-щебенева підсіпка, по ній бетонна стяжка, гідроізоляція, цементно-піщана стяжка, керамічна плитка або паркет. Інформація про наявність у конструкції підлоги спеціальних утеплюючих матеріалів відсутня.

Система опалення від власної газової котельні, яка розташована окремо від будівлі. В котельні встановлено дев'ять індивідуальних газових котлів «МИНИ ДОН-40», загальною потужністю 360 кВт. Теплоносій - вода. Температурний графік 80/60 °С. Циркуляція теплоносія в будівлі відбувається за рахунок циркуляційного насосу. Облік споживання теплової енергії на потреби системи опалення здійснюється за рахунок обліку витрати паливних ресурсів (газу) в натуральному вимірі.

Охолодження в будівлі не передбачене.

Механічна система вентиляції не працює. Вентиляція приміщень будівлі здійснюється в натуральний спосіб за рахунок перепаду тиску в середині та зовні будівлі та повітропроникності огорожувальних конструкцій (через нещільності в віконних конструкціях і відкриті елементи віконних, дверних конструкцій при провітрюванні). Видалення повітря здійснюється через вентиляційні канали, які розташовані в санвузлах, кухнях та в декількох приміщень.

Для освітлення переважно використовуються світлодіодні світильники, люмінесцентні світильники та в малій кількості лампи розжарювання. Система керування освітленням – ручна. Датчики присутності людей – відсутні. Облік споживання електричної енергії на потреби системи освітлення не проводиться.

За допомогою динамічного моделювання у програмному середовищі DesignBuilder було проведено аналіз енергоефективності будівлі, яка пройшла термомодернізації огорожуючих конструкцій та використовує переривчасті графіки опалення, в результаті впровадження відновлювальних джерел енергії та модернізації системи опалення.

Проведення досліджень:

За допомогою інструментів доступних в програмі DesignBuilder [6,7], була створена базова модель школи (рис. 1) та поміщена в кліматичні умови м. Київ та м. Одеса, оскільки ці міста є репрезентативними для I та II кліматичних зон України [4], що дозволило узагальнити отримані результати для всіх типових кліматичних зон України, оскільки DesignBuilder враховує погоду за допомогою міжнародного погодного файлу

IWEC[8,9], який містить годинні дані про температуру, вологість, вітер, опади, сонячну радіацію та інші параметри для певного регіону. Однією з переваг програмного середовища DesignBuilder є можливість використання динамічного методу, тобто врахування зміни всіх параметрів будівлі погодинно. Верифікація моделі була проведена за допомогою порівняльного аналізу енергоспоживання на опалення в програмному середовищі RETScreen[10] для будівлі розташованої в м. Київ, відносна похибка складає 2 %.

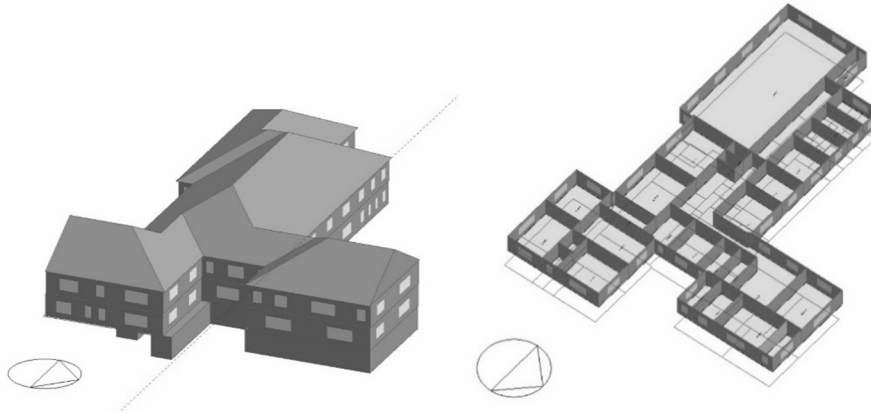


Рисунок 1 – модель школи у DesignBuilder

Основою енергозберігаючих режимів опалення є зниження температури в приміщеннях з опаленням на 3 °С в часи, коли люди в них не перебувають. У роботі взято до уваги, що рекомендується знижувати температуру не більш ніж на 4 °С від нормальної для забезпечення комфортного перебування людей в приміщенні в час переходу від зниженої температури до комфортної [11], а також те, що будівлю школи в основному використовують діти, тому було вирішено обмежитись спадом в 3 °С.

Аналіз проводився для таких режимів опалення, які є найбільш репрезентативними та/або легко реалізуються в умовах закладів освіти сучасної України:

Режим №1 – це базова модель з постійним режимом опалення – режим є звичайним для багатьох закладів освіти в Україні, оскільки в більшості шкіл інший графік неможливо впровадити без технічного оновлення.

Режим №2 – зниження температури до 17 °С у вихідні дні, канікули та святкові дні – режим характеризується відносно малими зусиллями в реалізації, вимагаючи втручання в роботу системи опалення не частіше ніж два рази на тиждень, впливаючи на роботу нагрівача, котла або запірної арматури в ІТП.

Режим №3 зниження температури у вихідні дні, канікули, святкові дні, а також у неробочі години, тобто з 19:00 до 07:00. Так як заняття починаються о 08:00 годині температуру опалення підвищено заздалегідь для комфортних умов перебування у школі – режим характеризується відносно незначними зусиллями, потребуючи втручатись в роботу системи опалення не частіше ніж два рази на день, при цьому надає змогу відчутно скоротити часи роботи системи опалення на повну потужність без встановлення програмованих термостатів, або іншої автоматизації.

Режим №4 пониження температури до 17 °С та пониженням рівня повітрообміну до 0,3 год у вихідні дні, канікули та святкові дні.

Режим №5 зниження температури, та пониженням рівня повітрообміну до 0,3 год⁻¹ у вихідні дні, канікули, святкові дні, а також у неробочі години (з 19:00 до 07:00).

Температура в приміщеннях шкіл встановлюється згідно з [4], тому в дослідженні за основу було взято температуру внутрішнього повітря в приміщеннях в 20 °С.

Для вивчення питання підвищення рівня енергоефективності будівлі шкільного закладу шляхом застосування енергоефективних режимів опалення енергетична модель на основі реально існуючої будівлі ЗОШ була використана як базова.

Першим кроком дослідження є застосування вище описаних режимів опалення в базову модель без зміни оболонки чи систем будівлі для двох кліматичних зон.

За результатами моделювання в річному розрізі в Київській кліматичній зоні питоме споживання енергії на опалення було зменшено з 44,5 кВт·год/м³ до 40 кВт·год/м³ при застосуванні режиму 2 та до 36,4 кВт·год/м³ для режиму 3, що становить зниження на 10 % та 18,1 % відповідно.

Отже, для випадку неутепленої будівлі в I кліматичній зоні, застосування опалення за графіками помітно зменшує споживання енергії на опалення. Крім того, результати свідчать про значне зниження споживання при переході від режиму 2 до режиму 3, а саме 9%, підтверджуючи доцільність використання останнього незважаючи на більшу складність технічної реалізації даного режиму опалення.

Для випадку неутепленої будівлі розташованої в кліматичних умовах м. Одеса, енергоспоживання базової моделі складає 40,2 кВт·год/м³, режим опалення №2 показав зменшення в питомому споживанні на опалення до 35,8 кВт·год/м³, а режим 3 до 32,1 кВт·год/м³, що відповідає зменшенню на 11,1 % та 20,1 % відносно базової моделі.

Як і у випадку для м. Київ, режим 3 показав значне підвищення енергоефективності будівлі в порівнянні з режимом 2, а саме 10 %.

Незважаючи на те, що будівлі в м. Одеса показала більшу, в порівнянні з випадком для м. Київ, відносну економію енергії (10 % проти 11,1 % для режиму 2 та 18,1 % проти 20,1 % для режиму 3), різниця питомого споживання є майже однаковою (близько 4,4 та 8,1 кВт·год/м³ відповідно).

Варто зазначити, що для будівель з низьким рівнем теплового захисту в різних кліматичних зонах має приблизно однаковий рівень економії енергії при застосуванні переривчастих режимів опалення.

Результати помісячного аналізу споживання показують наступне:

Споживання для всіх режимів опалення в обох кліматичних зонах найбільше в січні, що пов'язано з найнижчою (порівняно з іншими) середньомісячною температурою в цьому місяці.

Режим 3 є найефективнішим і для м. Київ і для м. Одеса для всіх місяців, що підтверджує результати вище.

Зменшення питомого споживання енергії на опалення при застосуванні енергоефективних режимів знову є майже однаковою при порівнянні однакових режимів в різних кліматичних умовах (наприклад, в січні місяці модель в м. Київ показала зменшення на 0,78 та 1,39 кВт·год/м³ при застосуванні режиму 2 та 3 відповідно, а в м. Одеса 0,78 та 1,40 кВт·год/м³ для тих самих режимів.

В середньому відсоток ефективності переривчастого режиму опалення №2 складає 10 %, але в залежності від сезону він може коливатися від 6 % до 22 % для м. Київ та від 7 % до 26 % для м. Одеса. Режим №3 показує свою ефективність в середньорічному виразі на рівні 20 %, а в помісячному розрізі коливається від 7 % до 26 % для м. Київ та від 16 % до 40 % для м. Одеса.

В загальному, співвідношення відносної економії між будівлями в I та II кліматичних зонах відповідає отриманим в розрахунках вище, але цікавим моментом є різна відносна економія в залежності від місяця, який розглядається. Таке явище можна пояснити різними базовими рівнями споживання через різницю середньомісячних температур.

Наступним кроком було дослідити ефективність переривчастих режимів опалення при термомодернізації огорожувальних конструкцій, приведених до мінімальних норм для м. Києва згідно ДСТУ [5]. Аналіз також проводився для випадків розташування у двох кліматичних зонах.

Для цього в базову енергетичну модель для покращення поточного стану зовнішніх стін було додано шар утеплювача мінеральної вати товщиною 150 мм. Утеплення даху забезпечено додаванням шару мінеральної вати товщиною 200 мм. Вікна замінені на двокамерні з аргоновим наповнювачем для досягнення нормативного опору теплопередачі.

До таблиці 1 зведені дані щодо існуючого стану огорожувальних конструкцій будівлі, мінімальних нормативних вимог до утеплення будівлі та рівня опору теплопровідності з яким змодельована будівля для випадку «утеплена будівля».

Таблиця 1 – Опір теплопередачі зовнішніх огорожувальних конструкцій існуючої будівлі ($R_{існ}$), мінімальних нормативних вимог ($R_{норм}$) та опори які були використанні для моделювання утепленої будівлі ($R_{ут}$)

Вид огорожувальної конструкції	$R_{існ}$, м ² ·К/Вт	$R_{норм}$, м ² ·К/Вт	$R_{ут}$, м ² ·К/Вт
Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	2,91	4,00	4,73
Покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалюваних горищ	0,71	6,00	6,25
Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,61	0,90	0,90

За даними моделювання, при теплоізоляції будівлі розташованої в кліматичних умовах м. Київ, питоме споживання енергії на опалення було зменшено з 44,5 кВт·год/м³ до 40,1 кВт·год/м³ (покращення 9,9 %), а для будівлі в м. Одеса з 40,2 кВт·год/м³ до 36,1 кВт·год/м³ (покращення 10,3 %). Таким чином, теплоізоляція до нормативних вимог ізоляції будівель є майже однаково ефективним для розглянутої будівлі, незалежно від кліматичної зони в якій вона знаходиться. В загальному, результати моделювання підтверджують доцільність теплоізоляції будівель до нормативних умов.

Додатково, продовжуючи дослідження впливу енергоефективних режимів опалення на будівлі шкільних заходів що пройшли термомодернізацію, запропоновано також дослідити вплив енергоефективних режимів опалення в будівлях з механічною системою вентиляції.

Наявність механічної системи вентиляції в будівлі дозволяє регулювати надходження зовнішнього повітря. Надходження зовнішнього повітря в базову модель будівлі (за нормативами прийнята на рівні 1 год-1) [12]. При впровадженні енергоефективних режимів опалення, система вентиляції відмикається в той час коли в системі опалення впроваджується провал.

Результати питомого річного споживання енергії на опалення наведені на Рисунок 2.

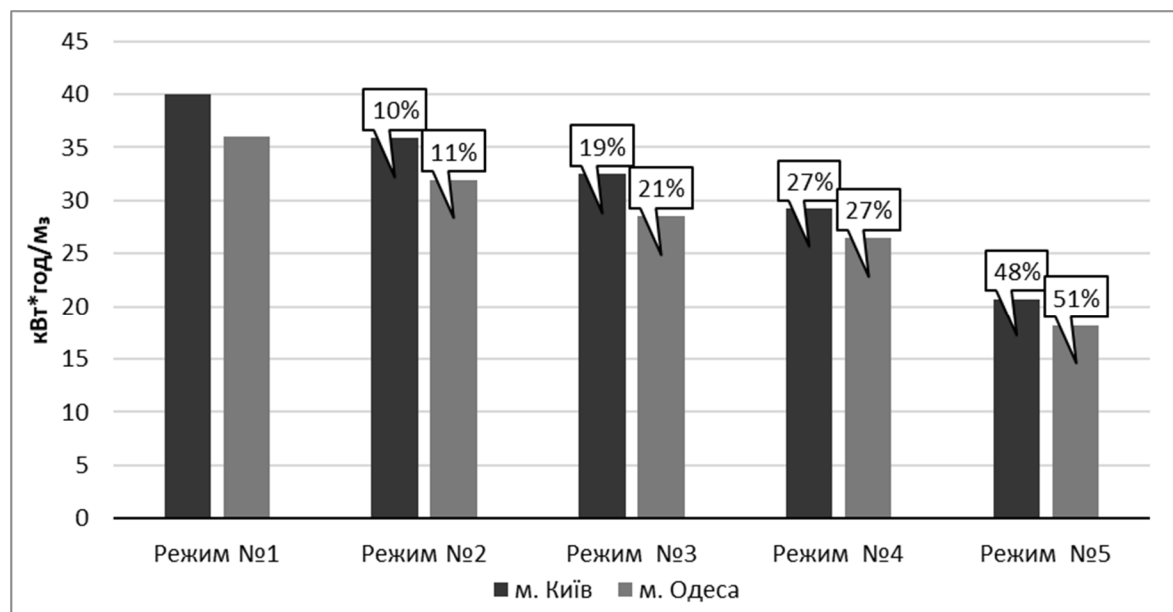


Рисунок 2 – Річне споживання енергії на опалення для будівлі розташованої в двох кліматичних зонах

За графіком, наведеним вище, застосування енергоефективних режимів опалення дозволило зменшити питоме споживання для випадку теплоізованої будівлі з $40 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ до $35,9 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $32,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ (10 % та 19 % економії) при використанні режимів №2 та №3 відповідно для I кліматичної зони, та з $36 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ до $32 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $28,5 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ (11 % та 21 % економії) для II кліматичної зони. А додавання переривчастих режимів на вентиляцію, тобто режими №4 та №5 дозволяє знизити енергоспоживання до $29,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $20,7 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ (27 % та 48 % економії) для I кліматичної зони, а для випадку II кліматичної зони знизити енергоспоживання до $26,4 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$ та $18,2 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{м}^3$, що становить 27 % та 51 % економії.

Моделювання енергоефективних режимів опалення для будівель з тепловою оболонкою доведених до нормативного значення I кліматичної зони [5] продемонструвало таке ж саме відносно до випадку без регулювання покращення енергоефективності. Це може бути пояснено тим, що при теплоізоляції будівлі пропорційно зменшилось базове споживання як будівлі без регулювання так і будівель з енергоефективними режимами опалення для випадків обох кліматичних зон.

Також, скорочення надходжень навколишнього повітря в будівлі на додаток до введення переривчастих режимів опалення дозволяє значно зменшити енергоспоживання будівлі не залежно від кліматичної зони в якій розташована будівля.

Оскільки масивність ізоляційних матеріалів є значно меншою за масивність несучих конструкцій (густина керамічної цегли – $1600 \text{ кг}/\text{м}^3$, а густина мінеральної вати – $30 \text{ кг}/\text{м}^3$ [5]), тобто масивність огорожень змінилась несуттєво. Досліджено вплив збільшення опору теплопередачі на коливання енергоспоживання системою опалення в випадках введення переривчастих режимів. Для цього, був проведений погодинний аналіз потреби на опалення в будівлі розташованої в м. Київ (рис. 3) та Одеса (рис. 4):

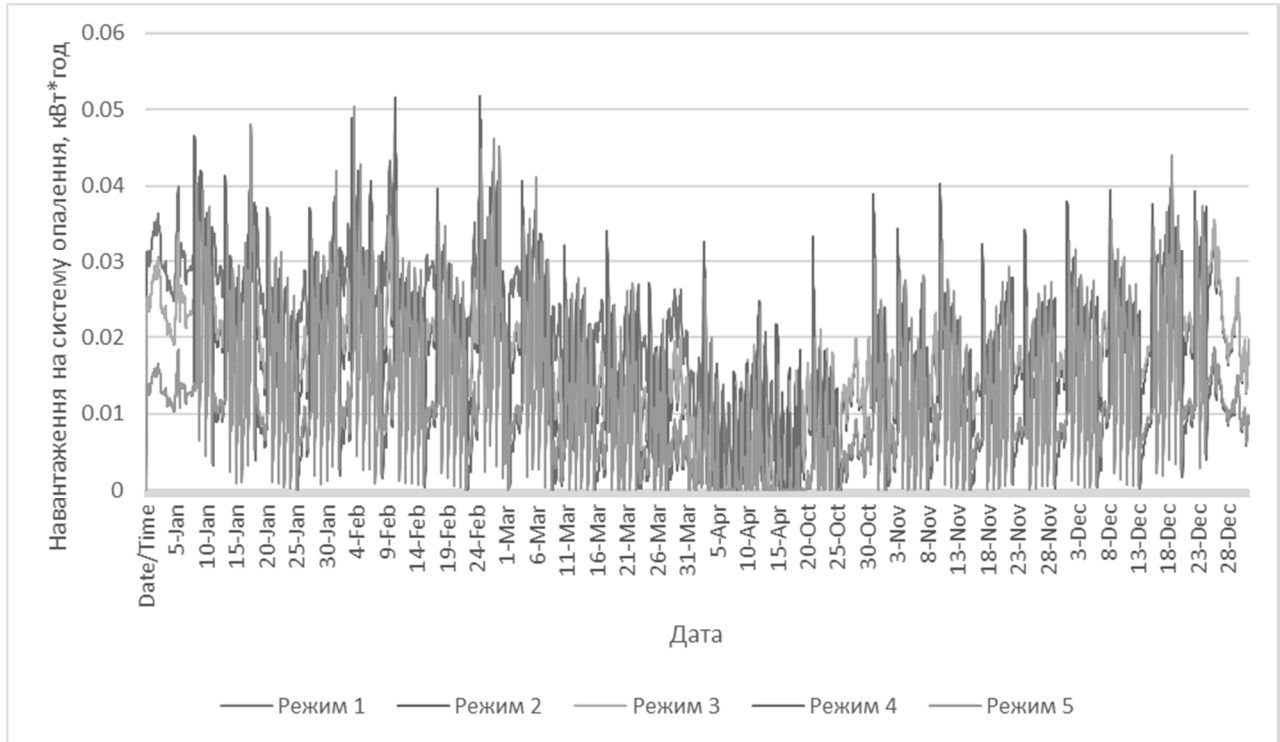


Рисунок 3 – Споживання енергії на потреби опалення, кВт·год утеплена будівля м. Київ

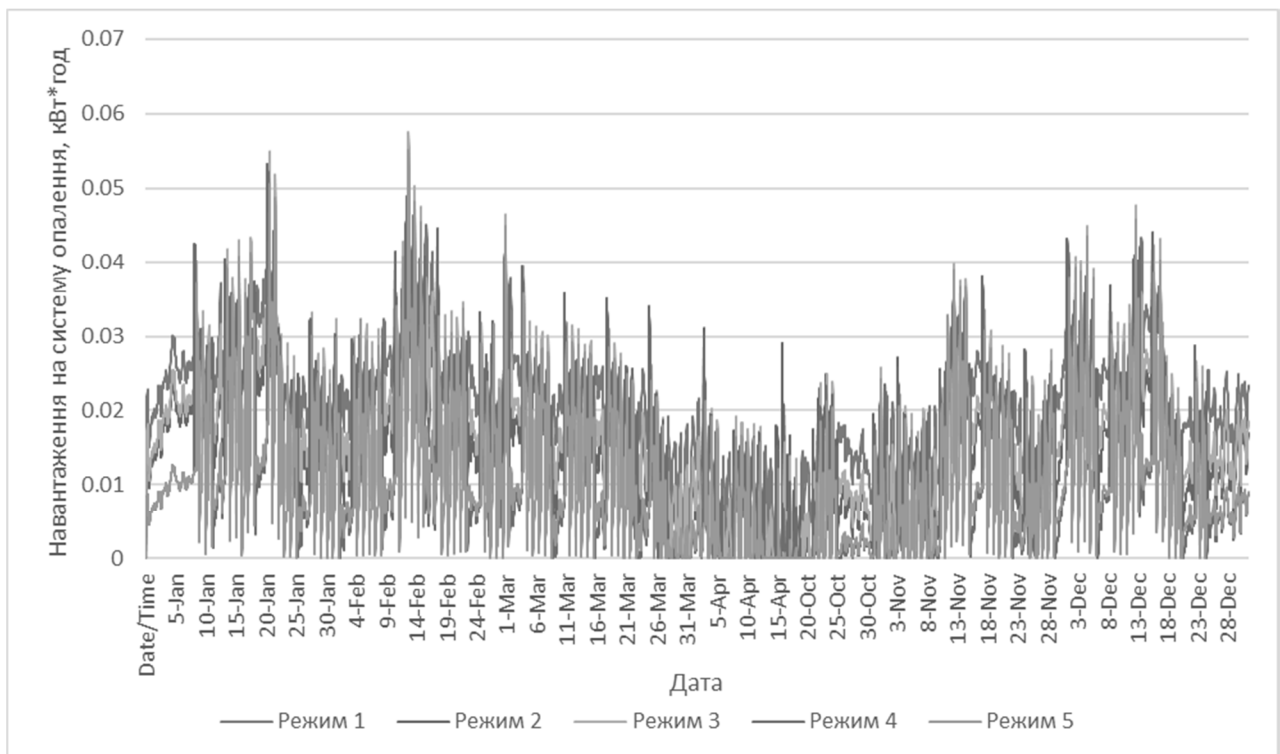


Рисунок 4 – Споживання енергії на потреби опалення, кВт·год утеплена будівля м. Одеса

Перехідні періоди в будівлях без утеплення в випадках введення режимів опалення (режими 2 та 3 рис. 3 та 4) характеризуються значними, в порівнянні з постійним режимом опалення, піками одночасно з меншим сумарним споживанням, що підтверджують отримані раніше результати. Найвище навантаження на систему опалення в I кліматичній зоні для режиму 1 складає 135846,81 Вт, а для режиму 2 167981,97 Вт та 166999,3 Вт для режиму 3. Для II кліматичної зони найвище навантаження складає 153986,31 Вт для режиму 1, 174926,41 Вт та режиму 2 та 176436,18 для режиму 3.

Аналіз погодинного споживання енергії на опалення в випадках термомодернізованої будівлі також показують характерне підвищення пікового споживання (й навантаження на систему опалення відповідно), проте, різниця зі споживанням для випадку постійного режиму опалення відчутно менша. У I кліматичній зоні режими 2 та 3 підвищують навантаження на систему опалення на 20,4 %, а у II кліматичній зоні на 9,3 % режим 2 та 12,7 % режим 3.

На рисунку 5 приведені результати теплового навантаження на систему опалення при впровадженні переривчастих режимів опалення.

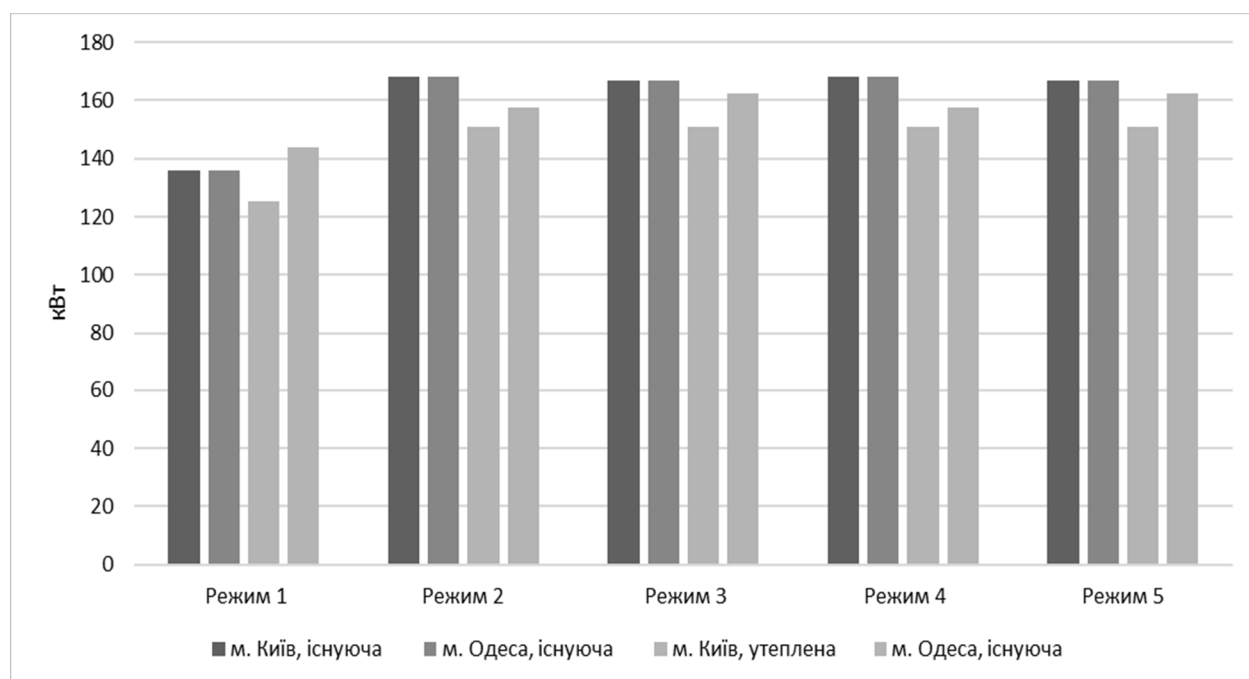


Рисунок 5 – Теплове навантаження на систему опалення для двох кліматичних зон

З даних можна зробити висновок, що для I кліматичної зони навантаження на систему опалення при впровадженні режиму 2 збільшується на 23,6 %, а для режиму 3 на 22,9 %, відносно режиму 1 з постійним графіком опалення. На цьому прикладі яскраво відображається момент підвищення температури опалення до комфортної, тобто підвищення температури при режимі 2 відбувається на початку доби, а отже вночі коли зовнішня температура доби зазвичай сягає найнижчого рівня, а для режиму 3 підвищення внутрішньої температури відбувається зранку, за годину до того як прийдуть учні та навчальний персонал, тобто в більш теплий період доби. Для випадку утепленої будівлі підвищення рівня навантаження становить 20,4 % для обох переривчастих режимів (режим 1 та режим 2) відносно постійного (режим 1). Для II кліматичної зони зберігаються такі ж тенденції, підвищення рівня навантаження на систему опалення при існуючому стані

будівлі 13,5 % для режиму 2 та 14,5 % для режиму 3. Для утепленої будівлі режим 2 показує на 9,3 % вище, а режим 3 на 12,7 % вище навантаження відносно режиму 1. При визначенні навантаження на систему опалення в розрахунку враховується найнижча зовнішня температура, та не враховується внутрішні та зовнішні (сонячні) теплонадходження. Найнижчий рівень зовнішньої температури, відповідно до погодинного погодного кліматичного файлу IWEC [8,9] становить $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ для Одеси, в той час як для Києва найнижча зовнішня температура сягає $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$. При розрахунку енергоспоживання на потреби опалення враховується зміна зовнішніх кліматичних умов (зовнішня температура, сонячні теплонадходження, тощо), внутрішні теплонадходження від освітлення, обладнання та людей відповідно до графіків експлуатації будівлі, а також теплозахисні та теплоінерційні особливості оболонки будівлі, тощо (рис. 2–4).

Такі показники свідчать, що попри зменшення споживання енергії будівлею, потужність системи опалення має бути більшою для забезпечення комфортних умов перебування дітей в приміщеннях. Для запобігання дискомфорту в перехідні періоди для дітей та вчителів. В досліджуваних моделях підвищення температури до нормативної [12], відбувається завчасно, а саме за годину до початку навчального процесу.

Одним з варіантів запобігання високих значень пікового навантаження на систему опалення є поступове підвищення температури завчасно до годин прибуття людей в приміщення (наприклад по $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ кожну годину за 3 години до початку навчання), що легко досягається введенням програмованого терморегулювання.

Це явище, а також підхід до «виходу» на нормативну температуру варто враховувати як при впровадженні графіків в існуючу будівлю так і при модернізації систем опалення.

Такі дані свідчать про те, що, за умов комплексної термомодернізації будівні, рішення про введення регульованого або програмованого опалення має бути прийнятим до етапу проектування системи опалення.

На базі будівлі що пройшла термомодернізацію огорожуючих конструкцій, використовує переривчастий режим опалення та вентиляції (режим 5) було розглянуто чотири конфігурації системи опалення з впровадженням ВДЕ:

- котел на біопаливі;
- сонячні панелі;
- тепловий насос;
- тепловий насос+ сонячні панелі.

Для моделювання системи опалення з використанням котла на біопаливі, представлена на рисунку 6, а в програмному середовищі DesignBuilder було обрано відповідну систему з запропонованої бібліотеки з коригуванням коефіцієнта корисної дії відповідно до реальних умов 91 % [13].

Враховуючи техніко-геометричні характеристики школи, локацією для розташування сонячних панелей було визначено південну сторону скатного даху, як показано на рисунку 6, б. Пропонується встановити систему сонячних панелей з під'єднанням до центральної електричної мережі, для компенсації фактору нестабільного потоку сонячної радіації впродовж року на території розташування школи. Габарити однієї панелі – $2333 \times 1134 \times 30$ см, номінальна потужність модуля – 565 Вт, коефіцієнт ефективності – 0,21.

Для моделювання системи опалення з тепловим насосом було обрано тип теплового насоса повітря-вода, середньосезонний коефіцієнт перетворення електричної енергії в теплову (COP) – 2,5 [13] система представлена на рисунку 6, в. Енергоспоживання

будівлі при впровадженні різних джерел енергозабезпечення наведені на рисунку 7. Існуючим джерелом теплозабезпечення будівлі є газова котельня. Відповідно до діючих стандартів [13] ефективність газового котла 0,81.

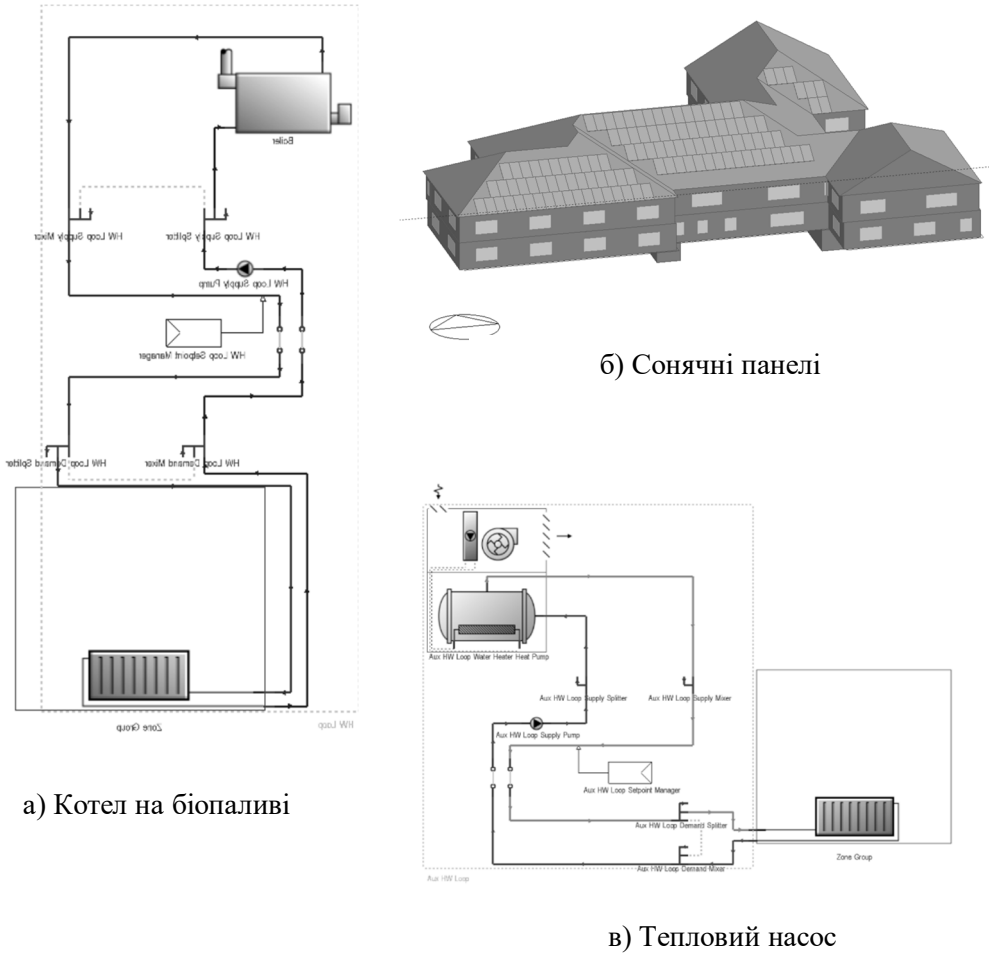


Рисунок 6 – Система опалення при впровадженні котлу на біопаливі в програмі DesignBuilder

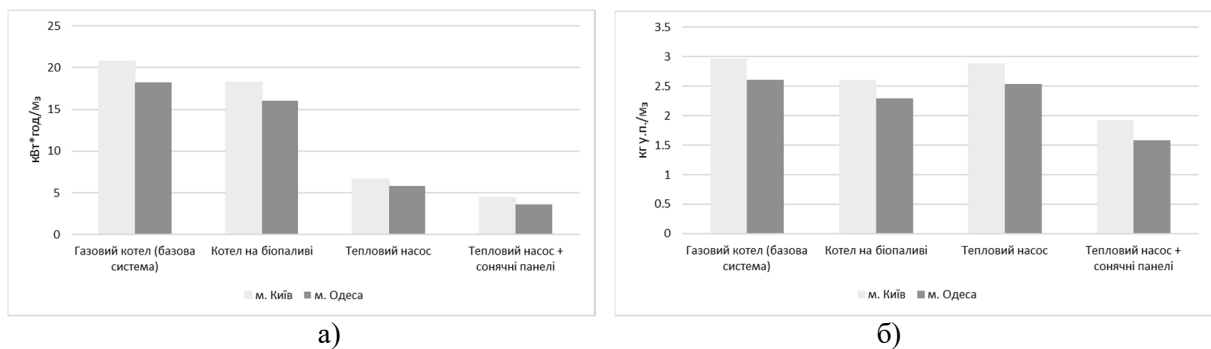


Рисунок 7 – Енергоспоживання на опалення для різних джерел енергозабезпечення: а) кінцеве споживання, б) первинне паливо

Згідно з результатів моделювання, котел на біопаливі показує найменше підвищення енергоефективності з трьох запропонованих, 2,5 кВт·год/м³ та 2,2 кВт·год/м³ (скорочення на 12% відносно базового рівня) в випадку м. Київ та Одеса відповідно, оскільки ККД котла значно нижчий за ефективність теплового насосу, що використовуються як основне джерело опалення в двох інших варіантів.

Впровадження сонячної панелі дозволило скоротити питоме споживання енергії на 2,21 кВт·год/м³ та 6,43 кВт·год/м³ для I та II кліматичних зон. Будівлі змогли досягти скорочення на 79 % та 80 % відносно покращеної базової моделі при впровадженні теплового насосу та сонячної панелі.

Завдяки впровадженню всіх покращень будівля скоротила споживання енергії на опалення на 90 %.

Також, для реального впливу на довкілля та споживання палива, був проведений аналіз споживання первинної енергії при модернізації системи опалення (рис. 7 б). Результати споживання по первинному паливу показують майже рівне питоме споживання для всіх запропонованих систем, тепловий насос лише на 2,7 % більш ефективний за газовий котел, та на 10,7 % менш ефективний за котел на біопаливі (для випадку м. Київ), що пояснюється низьким ККД виробництва електричної енергії в Україні, що в випадку Українських кліматичних умов не може бути покрито ефективністю теплового насосу повітря-вода.

Покращення відносно газового котлу показала система з впровадженою сонячною системою, оскільки згенерована електроенергія дозволила скоротити електроспоживання на опалення будівлі. Варто зазначити, що аналіз системи тепловий насос + сонячні панелі не є вичерпним, оскільки важко врахувати те, що більшість електроенергії виробляється саме в неопалювальний період.

Висновки. Впровадження режимів опалення за графіками дозволяє знизити енергоспоживання на опалення від 10 % до 20 % в залежності від режиму та кліматичної зони. Режим 3 є найбільш енергоефективним, але також найбільш складним для технічної реалізації. Ефект впровадження ефективного регулювання слабо залежить від кліматичної зони, а різницю в відносній економії можна пояснити меншим базовим рівнем питомого споживання в Одесі.

Виходячи з результатів у помісячного розрізі можна сказати, що у більш помірному кліматі енергоефективні режими опалення можуть показати ще вищий показник енергоефективності.

Регулювання системи вентиляції відповідно до переривчастих графіків опалення дозволяє зекономити 18 % для режиму №4, та 36 % для режиму №5, дані показники є однаковими для обох кліматичних зон, що обумовлює високий показник ефективності впровадження для усі регіонів України.

З результатів моделювання випливає, що найбільш енергоефективним є варіант з тепловим насосом та сонячною панеллю, який дозволяє знизити енергоспоживання на опалення на 79–80 % в різних кліматичних зонах. Варіант з котлом на біопаливі є найменш енергоефективним, оскільки ККД котла нижчий за ефективність теплового насосу. Впровадження всіх покращень дозволяє скоротити енергоспоживання на опалення на

90 %. Проте, система з тепловим насосом не є так само ефективною якщо проводити аналіз з точки зору споживання первинної енергії.

В подальшому пропонується дослідити використання теплових насосів вода-вода та ґрунт-вода а також їх комбінації з відновлювальними джерелами на споживання первинної енергії в будівлях дошкільної освіти.

Література

1. Оцінка економічної ефективності використання відновлювальних джерел енергії в освітніх установах / О.М. Ковальов, О.О. Ковальова, О.В. Черненко, О.О. Черненко // Економіка та організація управління. – 2021. – № 2 (32). – С. 67–76.

2. Енергоефективність переривчастих режимів опалення будівель з різними теплофізичними характеристиками огорожувальних конструкцій / О.В. Дешко, І.Ю. Білоус, Н.А. Буяк, О.В. Петрученко // Вісник НТУУ «КПІ». Серія: Машинобудування. – 2021. – № 2. – С. 32–41.

3. Стандарт ASHRAE Електронний ресурс] <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>.

4. Будівельна кліматологія: ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 с. 42.

5. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель / ДБН В.2.6-31:2021 [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2022, – 7 с.

6. "Офіційний сайт DesignBuilder". Доступно онлайн: <https://designbuilder.co.uk/>.

7. "Офіційний сайт EnergyPlus". Доступно онлайн: <https://energyplus.net/>.

8. International Weather for Energy Calculations Kyiv: [Електронний ресурс] https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450 IWEC.

9. International Weather for Energy Calculations Odesa: [Електронний ресурс] https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Odessa.338370 IWEC.

10. Офіційний сайт RETScreen [Електронний ресурс] <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>.

11. Білоус І.Ю., Дешко В.І., Буяк Н.А., Петрученко О.В. Аналіз впливу енергоефективних режимів опалення на енергоспоживання будівель на основі математичного моделювання. Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія». 2021. №4. С. 32–42.

12. Будинки і споруди. Заклади освіти /ДБН В.2.2-3:2018// [Національний стандарт України] – К.: Мінрегіон України, 2018, – 11с.

13. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання / Держспоживстандарт України // № 2. – С. 32–41.

Bibliography (transliterated)

1. Otsinka ekonomichnoyi efektyvnosti vykorystannya vidnovlyuval'nykh dzherel enerhiyi v osvitnikh ustanovakh / O.M. Koval'ov, O.O. Koval'ova, O.V. Chernenko, O.O. Chernenko // Ekonomika ta orhanizatsiya upravlinnya. – 2021. – № 2 (32). – P. 67–76.

2. Enerhoefektyvnist' pereryvchastykh rezhymiv opalennya budivel' z riznymy teplofizychnymy kharakterystykamy ohorodzhuval'nykh konstruktsiy / O.V. Dshko, I.YU. Bilous, N.A. Buyak, O.V. Petruchenko // Visnyk NTUU «KPI». Seriya: Mashynobuduvannya. – 2021. – № 2. – P. 32–41.
3. Standart ASHRAE Elektronnyy resurs] <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-90-1>.
4. Budivel'na klimatolohiya: DSTU-N B V.1.1-27:2010 p. 42.
5. Teplova izolyatsiya ta enerhoefektyvnist' budivel' / DBN V.2.6-31:2021 [Natsional'nyy standart Ukrayiny] – K.: Minrehion Ukrayiny, 2022, – 7 p.
6. "Official DesignBuilder Website." Available online: : <https://designbuilder.co.uk/>.
7. "Official EnergyPlus Website." Available online: <https://energyplus.net/>.
8. International Weather for Energy Calculations Kyiv: Available online https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Kiev.333450_IWEC.
9. International Weather for Energy Calculations Odesa: Available online https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/UKR/UKR_Odesa.338370_IWEC.
10. Ofitsiyyny sayt RETScreen [Elektronnyy resurs] <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>.
11. Bilous I.YU., Dshko V.I., Buyak N.A., Petruchenko O.V. Analiz vplyvu enerhoefektyvnykh rezhymiv opalennya na enerhospozhyvannya budivel' na osnovi matematychnoho modelyuvannya. Naukovyy zhurnal «Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohiyi, ekolohiya». 2021. №4. С. 32–42.
12. Budynky i sporudy. Zaklady osvity /DBN V.2.2-3:2018// [Natsional'nyy standart Ukrayiny] – K.: Minrehion Ukrayiny, 2018, – 11 p.
13. DSTU 9190:2022 Enerhetychna efektyvnist' budivel'. Metod rozrakhunku enerhospozhyvannya pid chas opalennya, okholodzhennya, ventylyatsiyi, osvitlennya ta haryachoho vodopostachannya / Derzhspozhyvstandart Ukrayiny // № 2. – P. 32–41.

УДК 621

В. І. Дешко^{1,2}, д-р техн. наук, проф., І. Ю. Білоус^{1,3}, канд. техн. наук, доцент,
О. О. Голубенко¹, аспірант, П. Ю. Сердечний¹, аспірант, Н. А. Яркова¹, магістр

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ШКОЛИ З ВРАХУВАННЯМ ЛОКАЛЬНИХ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Енергоефективність є однією з ключових тем, що стали дуже актуальними в останні роки. В будівлях, як кінцеві споживачі енергії, зосереджений найбільший потенціал енергозбереження. І водночас, важливою складовою енергоефективності є оптимальне використання енергоресурсів, де лівова частка припадає на споживання теплової енергії. В цьому контексті, графіки чергування опалення стають важливим інструментом для досягнення цієї мети. У даній статті автори досліджують енергоефективність різних

режимів опалення та вентиляції для школи розташованої в двох кліматичних зонах України: I (Київ) та II (Одеса). Використовуючи програмне забезпечення DesignBuilder, яке базується на моделі EnergyPlus, автори моделюють п'ять переривчастих режимів для системи опалення та вентиляції. Автори також порівнюють енергоефективність різних джерел тепла: котел на біопаливі, тепловий насос та сонячна панель. Виявлено, що впровадження режимів опалення за графіками дозволяє знизити енергоспоживання на опалення від 10 % до 20 % в залежності від режиму та кліматичної зони, а використання відновлювальних джерел енергії на базі впровадження переривчастих режимів опалення та вентиляції для школи показує ефективність на 79 %-80 %. Автори також аналізують вплив термомодернізації огорожуючих конструкцій на енергоефективність будівель. Висновок щодо введення переривчастих режимів опалення для неутеплених будівель є надзвичайно ефективним заходом з енергозбереження, а вплив заходу на енергозбереження будівлі буде відчутним й після теплосонації. Впровадження всіх покращень дозволяє скоротити енергоспоживання на опалення на 90 %.

Ключові слова: енергоефективність, опалення, вентиляція, тепловий насос, сонячна панель, DesignBuilder, EnergyPlus.

В. И. Дешко, д-р техн. наук, проф., И. Ю. Белоус, канд. техн. наук, доцент,
А. А. Голубенко, аспирант, П. Ю. Сердечный, аспирант, Н. А. Яркова, магистр

ОЦЕНКА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ШКОЛЫ С УЧЕТОМ ЛОКАЛЬНЫХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Энергоэффективность является одной из ключевых тем, которая стала очень актуальной в последние годы. В зданиях, как конечных потребителях энергии, сосредоточен наибольший потенциал энергосбережения. В то же время, важной составляющей энергоэффективности является оптимальное использование энергоресурсов, где основная часть приходится на потребление тепловой энергии. В этом контексте, графики чередования отопления становятся важным инструментом для достижения этой цели. В данной статье авторы исследуют энергоэффективность различных режимов отопления и вентиляции для школы, расположенной в двух климатических зонах Украины: I (Киев) и II (Одесса). Используя программное обеспечение DesignBuilder, базирующееся на модели EnergyPlus, авторы моделируют пять прерывистых режимов для системы отопления и вентиляции. Авторы также сравнивают энергоэффективность различных источников тепла: котел на биотопливе, тепловой насос и солнечную панель. Выявлено, что внедрение режимов отопления по графикам позволяет снизить энергопотребление на отопление от 10 % до 20 % в зависимости от режима и климатической зоны, а использование возобновляемых источников энергии на основе внедрения прерывистых режимов отопления и вентиляции для школы показывает эффективность на 79 %-80 %. Авторы также анализируют влияние термомодернизации ограждающих конструкций на энергоэффективность зданий. Вывод о введении прерывистых режимов отопления для неутепленных зданий является чрезвычайно эффективной мерой энергосбережения, а влияние меры на энергосбережение здания будет ощутимым и после теплосанації. Внедрение всех улучшений позволяет сократить энергопотребление на отопление на 90 %.

Ключевые слова: энергоэффективность, отопление, вентиляция, тепловой насос, солнечная панель, DesignBuilder, EnergyPlus.

V. Deshko, I. Bilous, O. Holubenko, P. Serdechnyi, N. Yarkova

**ASSESSMENT OF THE LEVEL OF ENERGY EFFICIENCY OF A SCHOOL
TAKING INTO ACCOUNT THE USE OF LOCAL RENEWABLE ENERGY
SOURCES**

Energy efficiency is one of the key topics that have become very relevant in recent years. In buildings, as the final consumers of energy, the greatest potential for energy saving is concentrated. And at the same time, an important component of energy efficiency is the optimal use of energy resources, where the lion's share falls on the consumption of thermal energy. In this context, heating schedules become an important tool for achieving this goal. In this article, the authors investigate the energy efficiency of different heating and ventilation modes for a school located in two climatic zones of Ukraine: I (Kyiv) and II (Odesa). Using the DesignBuilder software, which is based on the EnergyPlus model, the authors model five intermittent modes for the heating and ventilation system. The authors also compare the energy efficiency of different heat sources: a boiler on biofuel, a heat pump and a solar panel. It was found that the introduction of heating modes according to the schedules allows to reduce energy consumption for heating by 10 % to 20 % depending on the mode and climatic zone, and the use of renewable energy sources based on the introduction of intermittent heating and ventilation modes for the school shows efficiency at 79 %-80 %. The authors also analyze the impact of thermomodernization of enclosing structures on the energy efficiency of buildings. The conclusion on the introduction of intermittent heating modes for non-insulated buildings is an extremely effective measure for energy saving, and the impact of the measure on energy saving of the building will be noticeable even after thermal insulation. The implementation of all improvements allows to reduce energy consumption for heating by 90 %.

Keywords: energy efficiency, heating, ventilation, heat pump, solar panel, DesignBuilder, EnergyPlus.

К. В. Шевченко, д. ф. PhD, А. Б. Григоров¹, д. техн. н., професор

ВТОРИННІ ПОЛІМЕРИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНА СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКООКТАНОВОГО АВТОМОБІЛЬНОГО БЕНЗИНУ

¹ *Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут",
Харків, Україна*

Ключові слова: автомобільні бензини; вторинна сировина; полімери; каталізатор; піроліз; газ; рідкі фракції, хімічний склад; олефіни; технологія.

Вступ. Автомобільні бензини відносяться до тих видів моторних палив разом зі збільшенням обсягів споживання яких відбувається і посилення вимог до їх складу та експлуатаційних властивостей. Стрімке зростання чисельності світового автомобільного парку сприяє постійному збільшенню обсягів виробництва бензину а несприятлива екологічна обстановка у світі досить жорстко обмежує вміст в складі бензинів хімічних речовин (сірки, азоту, ароматичних сполук тощо), які при згорянні паливно-повітряної суміші здатні утворювати небезпечні для здоров'я людини та навколишнього середовища речовини. Задля цього, на теперішній час, в країнах Європейського Союзу діють стандарти екологічної безпеки Євро5 та Євро 6. Отже, пошуки сировини та розробка екологічно чистих технологій її переробки, які дозволять здійснити виробництво автомобільних бензинів, що відповідають вимогам діючих стандартів, без суттєвого їх здороження, відноситься до найактуальніших завдань сьогодення.

Мета та постановка завдання дослідження. Спираючись на дані, наведені в роботах [1, 2] автомобільний бензин можна розглядати як суміш рідкої базової вуглеводневої фракції із температурою кипіння від 30 до 215 °С з різними компонентами та присадками, що підвищують її стійкість до детонації. Рідка базова вуглеводнева фракція складається із суміші ароматичних, нафтових і парафінових вуглеводнів та їх похідних із числом атомів вуглецю від 5 до 10. Середня молекулярна маса цієї суміші в середньому знаходиться в межах 100–120 одиниць [3]. У відповідності до стандартів екологічної безпеки, які регламентують вміст сірки в товарному автомобільному бензині на рівні 5–10 ppm, для їх виробництва спеціально підбирають сировину (нафти, газові конденсати або їх суміші) [4], яка нерідко має значну вартість. Іншим підходом до зниження вмісту сірковмісних сполук в бензиновій фракції є проведення її гідроочищення з використанням водню, високих температур і тисків та складних комплексних каталізаторів. Окрім цього, зважаючи на геополітичні умови, що склалися навколо України останнім часом, виросла вартість і ускладнилася процедура транспортування як нафтової сировини, так і компонентів, які досить успішно використовувалися в складі бензинів і імпортувалися із-за кордону. Загалом все це призвело до збільшення виробничих витрат і, як наслідок, до зниження потужностей виробництва та власне здороження товарного автомобільного бензину.

Рішенням цієї проблеми є виробництво автомобільних бензинів з наявної і доступної сировини, використовуючи промисловий потенціал підприємств нафтопереробної галузі України. Пошук наявної і доступної сировини, на нашу думку, лежить в площині використання вторинної сировини, яка є більш дешевою сировиною ніж нафта і газові конденсати. До того ж, на теперішній час на території України на полігонах і сміттєзвалищах накопичилася значна кількість цієї сировини. З огляду на накопичені запаси, зда-

тні забезпечити промислове виробництво автомобільного бензину, низьку вартість, у порівнянні з нафтою та газовим конденсатом, хімічний склад, технологічність, найбільш перспективною сировиною, яка може бути використана в технології палива є вторинна полімерна сировина. При її термічній або термокаталітичній переробці можна отримати як базову вуглеводневу фракцію, так і стійкі до детонації компоненти автомобільних бензинів.

З огляду на це, метою даної роботи є аналіз можливості термічної або термокаталітичної переробки вторинної полімерної сировини в базові вуглеводневі фракції та компоненти товарних високооктанових автомобільних бензинів, які відповідають вимогам діючих в Україні стандартів екологічної безпеки.

Аналіз публікацій. Серед вторинної полімерної сировини для виробництва товарних автомобільних бензинів найбільш придатною вважається та сировина, яка в своєму складі не містить азоту, сірки та хлору, що досить часто вводяться до складу полімерних виробів для надання їх споживчих властивостей (наприклад, міцності) та спрощення умов їх отримання.

Наявність в складі полімеру азоту, сірки та хлору не тільки чинить негативний вплив на властивості отриманих з них товарних автомобільних бензинів, а й сприяють утворенню в процесі їх переробки різних шкідливих газоподібних викидів, для нейтралізації яких виникає потреба використання складних систем очищення. Спираючись на це зазначимо, що для використання в технології виробництва автомобільних бензинів є непридатними такі полімери як полівінілхлорид (ПВХ) та хлорсульфовані поліетилені (ХСП). Так, ХСП може містити до 2,5 % сірки та до 45 % хлору, а вміст хлору в ПВХ, може доходити аж до 57 % [5].

Інший полімер, який завдяки його властивостям неможливо переробити на товарний автомобільний бензин є поліетилентерефталат (PET). Продуктами термічної деструкції PET є бензол, дифеніл, CO, CO₂ та етилен [6]. Однак, існує робота [7], в якій запропоновано виробляти компонент бензину та антифризу шляхом метанолізу. Цей процес супроводжується кількісним перетворенням поліетилентерефталату (PET) у п-ксилол (PX) та етиленгліколь (EG) на модифікованому каталізаторі Cu/SiO₂ з використанням метанолу як розчинника і донору водню.

Натомість, більшість науковців сходяться на думці, що найбільш придатною сировиною для термічної та термокаталітичної переробки в компоненти автомобільних бензинів виступають поліолефіни: поліетилені (HDPE та LDPE) та поліпропілен (PP).

Тож в роботі [8] наведено особливості процесів термічної та термокаталітичної переробки HDPE та характеристика отриманих продуктів. Максимального виходу рідких продуктів деструкції – піролізної оливи, який складав біля 78,7 %, було досягнуто в інтервалі температур 440–460 °C.

В роботі [9] проводили піроліз PP і HDPE в діапазоні температур 250–400 °C з отриманням рідких паливо-подібних продуктів (вихід коливався в межах 69,82–80,88 %) з вмістом олефінових вуглеводнів на рівні 25,7 % для PP та 31,90 % для HDPE.

Шляхом термічного піролізу LDPE, при температурі 340 °C та атмосферному тиску, за допомогою ініціатору фазового переходу (1-гексену), за відсутності каталізатора, було отримано мазут з виходом біля 90 % [10].

Некаталітичний піроліз HDPE і LDPE при 450–621 °C дозволив отримати продукти, які за вуглеводневим складом (C₅–C₁₂) схожі на бензин. Вихід цих фракцій склав 17 % та 58 % відповідно [11].

Результати експериментів, пов'язаних із перетворенням мішків для транспортування відходів із поліетилену низької щільності (LDPE) на паливо за допомогою економічного методу каталітичного піролізу в реакторі періодичної дії з використанням ок-

сиду цинку (ZnO) як каталізатора представлено в роботі [12]. Конверсія сировини в синтетичну оливу склала 67,30 %. Вміст олефінів та ароматичних вуглеводнів склав 18,7 % та 40,0 % відповідно.

Досить цікаві результати, отримані в роботі [13], що присвячена дослідженню впливу вмісту бензину, отриманого при піролізі РР, в паливній суміші на потужність двигуна. Встановлено, що додавання 20 % синтетичного бензину у паливну суміш, зумовлює максимальну потужність двигуна (4,373 НР) при 3000 об/хв.

В роботі [14] представлено результати проведення термохімічної конверсії твердих відходів LDPE в реакторі зі зрідженим нафтовим газом (LPG). Вихід рідких продуктів склав 46 %, а їх теплота згоряння знаходилася на рівні 37500 кДж/кг.

Отримувати піролізну оливу, що за теплоотою згоряння подібну до мазуту, шляхом піролізу LDPE при температурах 385–425 °С запропоновано роботі [15]. Максимальний вихід піролізної олії склав 53,36 при температурі 405 °С, часу реакції 150 хв. та швидкості нагріву 8 °С/хв. Теплота згоряння піролізної оливи становила 43,438 кДж/кг.

Експериментальні дослідження. Проаналізувавши роботи, присвячені переробці поліолефінової сировини слід відзначити, що вони мають спільний вагомий недолік, що пов'язаний з переробкою чистої (модельної) полімерної сировини. В представлених дослідженнях практично ніколи не використовуються реальні об'єкти, що надходять із полігонів і сміттєзвалищ. Варто зазначити, що в тих випадках, коли в якості сировини використовується чистий або відсортований полімерний матеріал із пунктів сортування вторинної сировини, за вмістом сірки та азоту, рідкі продукти деструкції будуть відповідати вимогам стандартів Євро-5 та Євро-6. Коли ж сировина надходить із полігонів і сміттєзвалищ, то в рідких продуктах деструкції може знаходитися біля 200 ppm сірко-вмісних сполук, що не відповідає навіть стандарту Євро-3, що тимчасово прийнятий в Україні. Отже, етап попередньої підготовки полімерної сировини, який складається із її сортування за видами, промивання, просушування та подрібнення є досить важливим в забезпеченні відповідної якості кінцевого продукту та має бути невід'ємною частиною будь-якої термодеструктивної переробки полімерів в базові фракції або високооктанові компоненти автомобільних бензинів.

До того ж, проведені нами лабораторні дослідження (досліджувалося 20 зразків полімерної сировини), дозволили визначити загальні середні температурні (t , °С) і гідравлічні (P , МПа) режими процесу термічного і каталітичного піролізу та відповідний до цих режимів вихід бензинової фракції ($V_{б.ф.}$, %), що википає в межах 30–200 °С (див. табл. 1).

Вміст олефінових (О, %) і ароматичних (А, %) вуглеводнів, що зумовлюють стійкість до детонації отриманих бензинових фракцій (ОЧМ, од.), визначений за допомогою капілярного газовому хроматографі GC 2010 Plus, фірми Shimadzu та представлено в табл. 2.

Отримані результати повністю узгоджуються з дослідженнями вітчизняних і закордонних вчених щодо можливості використання бензинових фракцій, отриманих шляхом термічного і каталітичного піролізу вторинної полімерної сировини при виробництві автомобільних бензинів. Але досить значний вміст олефінових вуглеводнів у складі отриманих фракцій сприяє їх не високій хімічній стабільності та значно знижує тривалість зберігання такої продукції. Тому, незважаючи на пониження стійкості до детонації, для отримання кінцевого товарного продукту – базової фракції, необхідно провести селективну очистку, спрямовану на зниження вмісту олефінових вуглеводнів до вимог стандарту [16]. Іншим способом зменшення вмісту олефінових вуглеводнів в бензиновій фракції, отриманої термічним або термокаталітичним піролізом є її компаундування з прямогонними бензиновими фракціями, або високооктановими продуктами вторинних термокаталітичних процесів переробки нафтової сировини.

Таблиця 1 – Температурні і гідравлічні режими процесу термічного і каталітичного піролізу

Тип полімерної сировини	Піроліз					
	Термічний			Каталітичний		
	V _{б.ф.} , %	P, МПа	t, °C	V _{б.ф.} , %	P, МПа	t, °C
HDPE, LDPE	35–40	0,1–3,5	380–450	50–60	0,5–2,0	360–420
PP	40–50		330–390			

Таблиця 2 – Вміст олефінових і ароматичних вуглеводнів в отриманих бензинових фракціях

Тип полімерної сировини	Піроліз					
	Термічний			Каталітичний		
	A, %	O, %	ОЧМ, од.	A, %	O, %	ОЧМ, од.
HDPE, LDPE	–	32–37	68	30–34	27–30	80
PP	–	35–41	71	32–37	30–35	83

При реалізації технології термічного та термокаталітичного піролізу вторинної полімерної сировини окрім рідких продуктів утворюються побічні продукти у вигляді коксу (до 10 %) та вуглеводневих газів (в середньому 10–25 %). Зазвичай, ці продукти використовують для власних потреб виробництва, для отримання теплової енергії. Проте більш доцільним є використання вуглеводневих газів, представлених головним чином, етиленом, пропіленом, бутиленом [17] як сировини для отримання полімер-бензину (базова фракція) та високооктанових компонентів – алкілатів.

З огляду на все викладене вище, у загальному вигляді технологію виробництва товарних високооктанових автомобільних бензинів з вторинної полімерної сировини (HDPE, LDPE та PP), можна представити у вигляді структурної блок-схеми, наведеної на рис. 1.

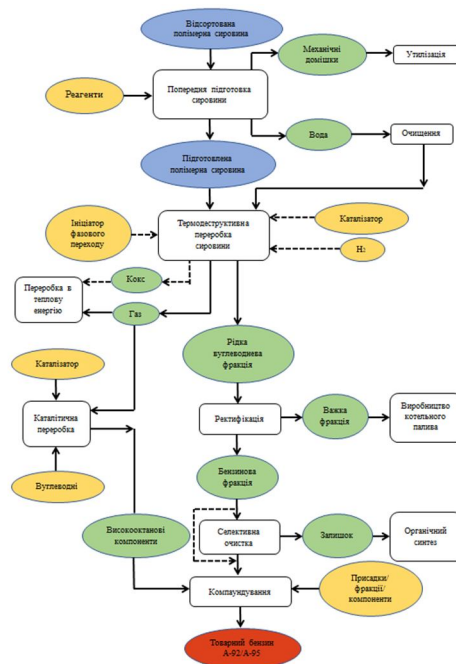


Рисунок 1 – Схема виробництва товарних високооктанових автомобільних бензинів з вторинної полімерної сировини (HDPE, LDPE та PP)

З метою раціонального використання виробничих ресурсів в запропонованій схемі виробництва високооктанових автомобільних бензинів, передбачено використання побічних продуктів виробництва. Так, на стадії підготовки сировини утворюються механічні домішки та вода. Механічні домішки використовуються у дорожньому будівництві для створення під'їзних шляхів до установки, вода після механічної та біохімічної очистки повертається до виробничого циклу, де використовується в теплообмінному обладнанні. Побічні продукти термодеструктивної переробки полімерної сировини кокс та газ використовуються для забезпечення виробничого процесу (отримання теплової енергії). У випадках, коли кількість утворених газів піролізу сягає 15 %, передбачено їх використання як сировини каталітичної переробки, спрямованої на отримання алкілатів.

Висновки. Аналіз технічної інформації щодо можливості використання вторинної полімерної сировини у виробництві високооктанових автомобільних бензинів показав, що найбільш перспективною сировиною, при переробці якої можна отримати продукти (базові фракції та високооктанові компоненти), які відповідають вимогам діючих стандартів екологічної безпеки, виступають поліолефіни: HDPE, LDPE та PP.

Встановлено, що основним технологічним процесом переробки такої сировини виступає термічний та термокаталітичний піроліз ($t=320-450\text{ }^{\circ}\text{C}$; $p=0,1-3,5\text{ МПа}$), який дозволяє отримати рідку бензинову фракцію (35–70 %) – цільовий продукт. В якості побічних продуктів утворюються гази піролізу, важкі паливні фракції, коксовий залишок, які можуть бути використані для власних потреб виробництва, для отримання теплової енергії. Водночас в тих випадках, коли серед продуктів піролізу утворюється понад 15 % газів (етилену, пропілену та бутілену), більш доцільним з економічної точки зору, є його каталітична переробка в полімер-бензин (базову фракцію) та високооктанові компоненти – алкілати.

На підставі проведених теоретичних і практичних досліджень запропоновано схему виробництва товарних високооктанових автомобільних бензинів з вторинної полімерної сировини (HDPE, LDPE та PP), яка базується на раціональному використанні виробничих ресурсів та побічних продуктів виробництва.

Література

1. Локомотивні експлуатаційні матеріали: навч. посіб. Ч. 1. Паливо / Д.С. Жалкін, С.Г. Жалкін, В.Г. Пузир, О.О. Анацький; за заг. ред. проф. С.Г. Жалкіна. – Харків: УкрДУЗТ, 2021. – 106 с.
2. Моторні палива: властивості та якість [текст] підручник / Сергій Бойченко, Андрій Пушак, Петро Топільницький, Казимир Лейда; за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К. : «Центр учбової літератури», 2017. – 324 с.
3. Сіренко Г.О. Фізико-хімія паливно-мастильних матеріалів: [монографічний підручник (спеціальний курс лекцій)] [за ред. Г. О. Сіренка] / Г.О. Сіренко, В.І. Кириченко, І.В. Сулима. – Івано-Франківськ : Супрун В. П., 2017 –366 с.
4. Tertyshna O.V. Estimatin of oil mixture componets compatibility by oscillator methodology / O.V. Tertyshna, K.V. Roienko, O.O. Kalinichenko, L.O. Snizhko // Проблеми хімотології. Теорія та практика раціонального використання традиційних і альтернативних паливно-мастильних матеріалів: монографія. – Київ: НАУ, 2014. – С. 159–164.
5. Гетьманчук Ю.П. Хімія високомолекулярних сполук : підруч. / Ю.П. Гетьманчук, М. М. Братичак. – Львів : Вид-во «Львівська політехніка», 2008. – 460 с.
6. Черваков Д.О. Сучасне уявлення про перебіг процесів деструкції поліетилентерефталату / Д.О. Черваков, К.М. Сухий, О.В. Черваков, О.С. Свердліковська // Journal of Chemistry and Technologies, 2023, 31(3), 522–529.

7. Zhiwen Gao. Converting waste PET plastics into automobile fuels and antifreeze components / Zhiwen Gao, Bing Ma, Shuang Chen, Jingqing Tian, Chen Zhao // Nature Communications. – 2022. – Volume 13. – 3343.
8. Conversion of waste high-density polyethylene into liquid fuels. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Award of the Degree of doctor of philosophy in chemical engineering. / Sachin Kumar. Department of Chemical Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008, 2015. – 206 p.
9. Imtiaz Ahmad. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products / Imtiaz Ahmad, M. Ismail Khan, Hizbullah Khan, Muhammad Ishaq // International Journal of Green Energy. – 2014. – Volume 12(7). –140303064405005. DOI:10.1080/15435075.2014.880146.
10. Yuanjia Zhang. Conversion of Polyethylene to High-Yield Fuel Oil at Low Temperatures and Atmospheric Initial Pressure / Yuanjia Zhang, Xueru Chen, Leilei Cheng, Jing Gu, Yulin Xu // Int J Environ Res Public Health. – 2023. – Volume 20(5). – 4048. DOI: 10.3390/IJERPH20054048.
11. Enggar Hero Istoto. Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods / Enggar Hero Istoto, Widayat, Singgih Saptadi // E3S Web of Conferences. – 2019. – № 125. – 14 011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912514011>.
12. Rajan, K.P. Catalytic Pyrolysis of Waste Low-Density Polyethylene (LDPE) Carry Bags to Fuels : Experimental and Exergy Analyses / Rajan, K.P.; Mustafa, I.; Gopanna, A.; Thomas, S.P. // Recycling. – 2023. – Volume 8(63). – 8040063. <https://doi.org/10.3390/recycling8040063>.
13. Aditya Wahyu Pratama. Performance Test of A mixture of Polypropylene Plastic Fuel from Pyrolysis with Gasoline to Torque and engine Power /Aditya Wahyu Pratama, Winarko // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1569. – 032045. doi:10.1088/1742-6596/1569/3/032045.
14. Tuly S.S. Liquid fuel production by pyrolysis of polythene and PET plastic /S.S. Tuly, Md. Momen Shahriar Joarder, Md. Enamul Haque // AIP Conf. Proc. – 2019. – Volume 2121(1). – 120001. <https://doi.org/10.1063/1.5115938>.
15. Mueanmas, C. Liquid Fuel Production from Polyethylene Plastic Waste by Pyrolysis Process / Mueanmas, C., Nikhom, R. // Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal. – 2022. – Volume 14(2), 405-417.
16. ДСТУ 7687:2015 «БЕНЗИНИ АВТОМОБІЛЬНІ ЄВРО. Технічні умови». – К.: «ДП УкрНДНЦ», 2015. – 15 с.
17. Supriyanto. Gaseous products from primary reactions of fast plastic pyrolysis /Supriyanto, Paivi Ylitervo, Tobias Richards // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2021. – Volume 158. – 105248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105248>.

Bibliography (transliterated)

1. Lokomotivni ekspluatatsiyni materIali: navch. posib. Ch. 1. Palivo / D.S. Zhalkin, S.G. ZhalkIn, V.G. Puzir, O.O. Anatskiy; za zag. red. prof. S. G. Zhalkina. – Harkiv: UkrDUZT, 2021. – 106 p.
2. Motorni paliva: vlastivosti ta yakist [tekst] pidruchnik / Sergiy Boychenko, Andriy Pushak, Petro Topilnitskiy, Kazimir Leyda; za zag. red. prof. S. Boychenka. – K. : «Tsentr uchbovoyi literaturi», 2017. – 324 p.
3. Sirenko G.O. Flzikhohimiya palivno-mastilnih materialiv: [monografichniy pidruchnik (spetsialniy kurs lektsiy)] [za red. G. O. Srenka] / G.O. Sirenko, V.I. Kirichenko, I.V. Sulima. – Ivano-Frankivsk : Suprun V. P., 2017 –366 p.

4. Tertyshna O.V. Estimatin of oil mixture componets compatibility by oscillator methodology / O.V. Tertyshna, K.V. Roienko, O.O. Kalinichenko, L.O. Snizhko // Problemi hImmotologiyi. Teoriya ta praktika ratsionalnogo vikoristannya traditsiynih i alternativnih palivno-mastilnih materialiv: monografiya. – Kiyiv: NAU, 2014. – P. 159–164.
5. Getmanchuk Yu.P. Himiya visokomolekulyarnih spoluk : pidruch. / Yu.P. Getmanchuk, M.M. Bratichak. – Lviv : Vid-vo «Lvivska politehnika», 2008. – 460 p.
6. Chervakov D.O. Suchasne uyavlennya pro perebig protsesiv destruktseyi polietilentereftalatu / D.O. Chervakov, K.M. Suhyy, O.V. Chervakov, O.S. Sverdlikovska // Journal of Chemistry and Technologies, 2023, 31(3), 522–529.
7. Zhiwen Gao. Converting waste PET plastics into automobile fuels and antifreeze components / Zhiwen Gao, Bing Ma, Shuang Chen, Jingqing Tian, Chen Zhao // Nature Communications. – 2022. – Volume 13. – 3343.
8. Conversion of waste high-density polyethylene into liquid fuels. A Thesis Submitted in Partial Fulfillment for the Award of the Degree of doctor of philosophy in chemical engineering. / Sachin Kumar. Department of Chemical Engineering National Institute of Technology Rourkela-769008, 2015. – 206 p.
9. Imtiaz Ahmad. Pyrolysis Study of Polypropylene and Polyethylene Into Premium Oil Products / Imtiaz Ahmad, M. Ismail Khan, Hizbullah Khan, Muhammad Ishaq // International Journal of Green Energy. – 2014. – Volume 12(7). –140303064405005. DOI:10.1080/15435075.2014.880146.
10. Yuanjia Zhang. Conversion of Polyethylene to High-Yield Fuel Oil at Low Temperatures and Atmospheric Initial Pressure / Yuanjia Zhang, Xueru Chen, Leilei Cheng, Jing Gu, Yulin Xu // Int J Environ Res Public Health. – 2023. – Volume 20(5). – 4048. DOI: 10.3390/IJERPH20054048.
11. Enggar Hero Istoto. Production of Fuels From HDPE and LDPE Plastic Waste via Pyrolysis Methods / Enggar Hero Istoto, Widayat, Singgih Saptadi // E3S Web of Conferences. – 2019. – # 125. – 14 011. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912514011>.
12. Rajan, K.P. Catalytic Pyrolysis of Waste Low-Density Polyethylene (LDPE) Carry Bags to Fuels : Experimental and Exergy Analyses / Rajan, K.P.; Mustafa, I.; Gopanna, A.; Thomas, S.P. // Recycling. – 2023. – Volume 8(63). – 8040063. <https://doi.org/10.3390/recycling8040063>.
13. Aditya Wahyu Pratama. Performance Test of A mixture of Polypropylene Plastic Fuel from Pyrolysis with Gasoline to Torque and engine Power /Aditya Wahyu Pratama, Winarko // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Volume 1569. – 032045. doi:10.1088/1742-6596/1569/3/032045.
14. Tuly S.S. Liquid fuel production by pyrolysis of polythene and PET plastic /S.S. Tuly, Md. Momen Shahriar Joarder, Md. Enamul Haque // AIP Conf. Proc. – 2019. – Volume 2121(1). – 120001. <https://doi.org/10.1063/1.5115938>.
15. Mueanmas, C. Liquid Fuel Production from Polyethylene Plastic Waste by Pyrolysis Process / Mueanmas, C., Nikhom, R. // Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal. – 2022. – Volume 14(2), 405–417.
16. DSTU 7687:2015 «BENZINI AVTOMOBILNI EVRO. TehnIchnI umovi». – K.: «DP UkrNDNTs», 2015. – 15 p.
17. Supriyanto. Gaseous products from primary reactions of fast plastic pyrolysis /Supriyanto, Paivi Ylitervo, Tobias Richards // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2021. – Volume 158. – 105248. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105248>.

К. В. Шевченко, А. Б. Григоров

ВТОРИННІ ПОЛІМЕРИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНА СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКООКТАНОВОГО АВТОМОБІЛЬНОГО БЕНЗИНУ

В статті проаналізовано можливість розширення сировинної бази процесу виробництва товарного високооктанового автомобільного бензину марок А-92 та А-95 за рахунок залучення вторинної полімерної сировини. Визначено види сировини, що дозволить отримувати базові фракції або компоненти товарних бензинів, які в подальшому будуть використовуватися при виробництві товарних автомобільних бензинів, які за своїм хімічним складом та властивостями відповідатимуть вимогам стандартів екологічної безпеки прийнятих в Україні та країнах Європейського Союзу.

Встановлено, що основною сировиною, яка здатна замінити нафту та газові конденсати є вторинна поліолефінова сировина, представлена поліетиленами (HDPE та LDPE) та поліпропіленом (PP), а основним процесом її переробки виступає термічний або термокаталітичний піроліз. Пріоритетною є сировина, що безпосередньо утворюється на виробництві в вигляді відходів та сировина, яка надходить з пунктів сортування. Одночасно вторинна полімерна сировина, не зважаючи на джерело її походження, повинна пройти стадію попередньої підготовки, що включає в себе сортування, подрібнення, промивку та просушку сировини.

Практичні дослідження показали, що цей процес реалізується на установках реакторного типу при температурах 320–450 °С і тисках 0,1–3,5 МПа та дозволяє отримати значний вихід (35–70 %) рідкого продукту піролізу – бензинової фракції з межами википання 30–200 °С. Разом з рідкими продуктами утворюється понад 15 % газів (етилену, пропілену та бутілену), які доцільно переробляти в полімер-бензин (базову фракцію) та високооктанові компоненти – алкілати.

В результаті проведених досліджень, запропоновано схему виробництва товарних високооктанових автомобільних бензинів з вторинної полімерної сировини (HDPE, LDPE та PP), яка базується на раціональному використанні виробничих ресурсів та побічних продуктів виробництва.

Ключові слова: автомобільні бензини; вторинна сировина; полімери; каталізатор; піроліз; гази; рідкі фракції, хімічний склад; олефіни; технологія.

К. В. Шевченко, А. Б. Григоров

ВТОРИЧНЫЕ ПОЛИМЕРЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ СЫРЬЕ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВИСОКООКТАНОВОГО АВТОМОБІЛЬНОГО БЕНЗИНА

В статье проанализирована возможность расширения сырьевой базы процесса производства товарного высокооктанового автомобильного бензина марок А-92 и А-95 за счет привлечения вторичного полимерного сырья. Определены виды сырья, позволяющие получать базовые фракции или компоненты товарных бензинов, которые в дальнейшем будут использоваться при производстве товарных автомобильных бензинов с химическим составом и свойствами, удовлетворяющих требованиям стандартов экологической безопасности, принятых в Украине и странах Европейского Союза.

Установлено, что основным сырьем, которое способно заменить нефть и газовые конденсаты, является вторичное полиолефиновое сырье, представленное полиэтиленами

(HDPE и LDPE) и полипропиленом (PP), а основным процессом его переработки выступает термический или термокаталитический пиролиз. Приоритетным является сырье, непосредственно образующееся на производстве в виде отходов, и сырье, поступающее из пунктов сортировки. При этом, вторичное полимерное сырье, несмотря на источник его происхождения, должно пройти стадию предварительной подготовки, которая включает в себя сортировку, дробление, промывку и просушку.

Практические исследования показали, что этот процесс реализуется на установках реакторного типа при температурах 320–450 °С и давлениях 0,1–3,5 МПа, и позволяет получить значительный выход (35–70 %) жидкого продукта пиролиза – бензиновой фракции с пределами выкипания 30–200 °С. Вместе с жидкими продуктами образуется более 15 % газов (этилена, пропилена и бутилена), которые целесообразно перерабатывать в полимер-бензин (базовую фракцию) и высокооктановые компоненты – алкилаты.

В результате проведенных исследований, предложена схема производства товарных высокооктановых автомобильных бензинов из вторичного полимерного сырья (HDPE, LDPE и PP), которая базируется на рациональном использовании производственных ресурсов и побочных продуктов производства.

Ключевые слова: автомобильный бензин; вторичное сырье; полимеры; катализатор; пиролиз; газы; жидкие фракции, химический состав; олефины; технология.

K. V. Shevchenko, A. B. Grigorov

SECONDARY POLYMERS AS A PROSPECTIVE RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF HIGH-OCTANE AUTOMOBILE GASOLINE

The article analyzes the possibility of expanding the raw material base of the production process of commercial high-octane automobile gasoline of the A-92 and A-95 brands due to the involvement of secondary polymer raw materials. The types of raw materials that will make it possible to obtain basic fractions or components of commercial gasolines that will be used in the production of commercial automobile gasolines that, according to their chemical composition and properties, will meet the requirements of environmental safety standards adopted in Ukraine and the countries of the European Union have been determined.

It was established that the main raw material capable of replacing oil and gas condensate is secondary polyolefin raw material, represented by polyethylene (HDPE and LDPE) and polypropylene (PP), and the main process of its processing is thermal or thermocatalytic pyrolysis. Priority is given to raw materials that are directly generated in production in the form of waste and raw materials that come from sorting points. At the same time, secondary polymer raw materials, regardless of their source of origin, must undergo a stage of preliminary preparation, which includes sorting, crushing, washing and drying of raw materials.

Practical studies have shown that this process is implemented on reactor-type installations at temperatures of 320–450 °С and pressures of 0.1–3.5 МПа and allows obtaining a significant yield (35–70 %) of the liquid product of pyrolysis – a gasoline fraction with a boiling point of 30–200 °С. Along with liquid products, more than 15 % of gases (ethylene, propylene and butylene) are formed, which should be processed into polymer gasoline (base fraction) and high-octane components – alkylates.

As a result of the research, a scheme for the production of commercial high-octane automobile gasoline from secondary polymer raw materials (HDPE, LDPE and PP) is proposed, which is based on the rational use of production resources and production by-products.

Keywords: automobile gasoline; secondary raw materials; polymers; catalyst; pyrolysis; gases; liquid fractions, chemical composition; olefins; technology.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1'2024

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 04.03.2024 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,6. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–30.
Зам. № 13. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.