



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
"КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО"**



**НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА
ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ**

**XVII НАУКОВО-ТЕХНІЧНА КОНФЕРЕНЦІЯ
«ЕНЕРГЕТИКА. ЕКОЛОГІЯ. ЛЮДИНА»**

ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

29 квітня 2025 р.

**КИЇВ
2025**

Енергетика. Екологія. Людина. Зб. наукових праць НН ІЕЕ, КПІ імені Ігоря Сікорського – Київ: ІЕЕ, 2025. – 109 с.

У збірнику представлено статті молодих фахівців з питань перспективних розробок та нових рішень в енергетиці сталого розвитку на XVII науково-технічній конференції «Енергетика. Екологія. Людина».

До збірника включено статті за такими напрямками: сталий розвиток енергетики, енергетичний менеджмент та інжиніринг, сучасні системи забезпечення електричною енергією, інжиніринг та автоматизація електротехнічних комплексів, мехатроніка енергоємних виробництв, проблеми видобутку корисних копалин, геотехнічне і міське підземне будівництво, інженерна екологія та ресурсозбереження, охорона праці, промислова та цивільна безпека, а також особливості функціонування паливно-енергетичного комплексу України з урахуванням природоохоронних вимог. Викладено методи аналізу системи електропостачання, дано оцінку рівнів енергозабезпеченості та енергоефективності з урахуванням екологічного фактора та впливу галузі на людину.

Друкується за рішенням Вченої Ради НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського

Оргкомітет конференції:

Голова комітету: Оксана **ВОВК**, д-р. техн. наук, професор, директор НН ІЕЕ.

Заступник голови – Олег **ЗАКЛАДНИЙ**, канд. техн. наук., доцент, заст. директора НН ІЕЕ з наукової та інноваційної роботи.

Члени оргкомітету:

Сергій БОЙЧЕНКО д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних систем;

Олена БОРИЧЕНКО канд. техн. наук., доцент, завідувач кафедри електропостачання

Наталя ЗУЄВСЬКА д-р. техн. наук, професор, в.о. завідувача кафедри геоінженерії;

Вікторія ВАПНІЧНА канд. техн. наук, доцент кафедри геоінженерії;

Софія ЖОЛТАЙЛИ PhD, старший викладач кафедри автоматизації електротехнічних та мехатронних систем;

Олег КОЦАР канд. техн. наук, доцент кафедри електропостачання;

Адреса організаційного комітету:

Україна, Київ, 03056, вул. Борщагівська, 115, корпус № 22

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Сайт конференції: www.power.kpi.ua

Укладання збірника наукових праць: Закладний О.О.

Матеріали подані у авторській редакції.

Відповідальність за зміст і достовірність даних несуть автори тез.

ISSN 2307-7239

© Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2025

ЗМІСТ

СЕКЦІЯ № 1. СТАЛИЙ РОЗВИТОК ЕНЕРГЕТИКИ. СУЧАСНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ЕНЕРГІЄЮ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Н. О. Поліщук. Підвищення стійкості і гнучкості систем комбінованого електропостачання житлових комплексів	6
Х.В. Сіваченко, О.В. Бориченко. Теплові електростанції як джерело дрібнодисперсного пилу: виклики та шляхи очищення	12
С.О. Ярошук, О. В. Бориченко. Роль гнучкого попиту (demand response) у декарбонізації енергетичних систем: міжнародний досвід і можливості для України	18
І.І. Богойко. Розвиток зарядної інфраструктури: аналіз досвіду країн ЄС та перспективи для України	24
К.М. Гілевич. Керування попитом активних споживачів	30
А.А. Лепешко. Перспективи розвитку електропостачання постійного струму в населених пунктах	46
Р.Д. Шматок. Ecofriendly матеріали для енергоефективного будівництва	52

СЕКЦІЯ 2. ІНЖИНІРИНГ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА МЕХАТРОННИХ КОМПЛЕКСІВ

К. В. Фута. Порівняльний аналіз кількості та якості вихідних продуктів в результаті переробки гумових відходів різних типів методом піролізу	58
A.R. Trachuk. Risk analysis and ways to neutralize them to increase the level of energy security in the renewable energy sector of Ukraine	63
О.О. Тригубець, А. В. Торопов. Одноконтурна система керування швидкістю телескопічного конвеєра логістичного хабу	68
Д. Гавриць, С.В. Бойченко Водень як основа сталого енергетичного переходу: аналіз ключових етапів водневого енергетичного циклу	73

СЕКЦІЯ 3. ГЕОІНЖЕНЕРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ЕКОЛОГІЯ ТА РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

I. Piskun, D. Zalivan, Ya. Naumov. Assessment of the feasibility of biochar application for restoring soil fertility in areas affected by titanium ore extraction	80
А. Петелька, Л. Скляр. Підвищення енергоефективності процесу зневоднення тонко подрібнених залізородних концентратів	86
А.В. Нестеренко, В.М. Сліденко, О.І. Тесленко. П'єзокавітаційна хвильова технологія інтенсифікації видобутку вуглеводнів	90

В.О.Назаренко, Г.В. Бруй, В.С. Волокітін Розрахунок похибки положення віддаленого пункту підземного полігонометричного ходу	94
К.В. Торунда, Н.В. Кушнірук. Обґрунтування залучення до виробництва техногенної сировини для зниження негативного впливу на зовнішнє середовище	99
В.О. Назаренко, Г.В. Бруй, Г.А. Новицький. Осідання земної поверхні при відході лави від розрізної печі	102
А.А. Лепешко. Конструктивні рішення станції метрополітену	107

СЕКЦІЯ 1.

СТАЛИЙ РОЗВИТОК ЕНЕРГЕТИКИ. СУЧАСНІ СИСТЕМИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЮ ЕНЕРГІЄЮ. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 121.31

Н. О. Полішук, магістрант,
кафедра електропостачання
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ І ГНУЧКОСТІ СИСТЕМ КОМБІНОВАНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВИХ КОМПЛЕКСІВ

Анотація. *В статті досліджено шляхи підвищення стійкості та гнучкості систем комбінованого електропостачання житлових комплексів, зокрема, в умовах агресивних зовнішніх впливів. Проаналізовано залежність сучасних житлових комплексів від централізованого електропостачання та запропоновано технічні рішення на основі комбінованих мікроенергетичних систем, що поєднують фотоелектричні та вітрові станції, установки зберігання енергії, мікрокогенераційні установки та електротранспортну інфраструктуру. На прикладі дев'ятиповерхового житлового будинку наведено методiku виокремлення пріоритетних та критичних навантажень, здійснено вибір устаткування та розроблено схеми електропостачання, які відрізняються застосуванням мультипортних конверторів з метою полегшення інтеграції мікрогенерувальних установок і навантажень та безпечною реконфігурацією мікросистеми за відсутності кваліфікованого персоналу, а також використанням ресурсу електромобілів для покриття дефіциту енергії. Запропонована система комбінованого електропостачання забезпечує надійне покриття пріоритетних та критичних навантажень житлового комплексу в острівному режимі, зокрема, під час повітряних атак та інших агресивних зовнішніх впливів.*

Ключові слова: житловий комплекс, підвищення стійкості, система комбінованого електропостачання, навантаження, споживання, сонячна панель, акумулятор.

Вступ. Енергозабезпечення житлових комплексів є ключовим аспектом функціонування сучасних урбаністичних інфраструктур. У разі виникнення критичних умов, таких як природні катаклізми, техногенні аварії або тривалі перебої в електропостачанні, забезпечення стабільної роботи інженерних систем будівель стає складним завданням. Це пов'язано з високою залежністю житлових комплексів від централізованих джерел електропостачання, а також зростанням енергоспоживання через інтенсифікацію використання електроприладів та систем забезпечення комфортних умов проживання.

Основною проблемою в умовах енергетичних криз є відсутність або недостатність автономних джерел енергії житлових комплексів (які за ПУЕ [3] відносять до другої категорії струмоприймачів за надійністю електропостачання), придатних забезпечити безперебійну роботу критично важливих систем, таких як опалення, вентиляція, водопостачання та освітлення. Переважна більшість багатоповерхових будинків запроєктовано з розрахунку на приєднання до централізованих мереж системи розподілу, що робить їх вразливими до перебоїв зовнішнього електропостачання. У разі тривалого вимкнення електроенергії життєдіяльність мешканців значно ускладнюється, особливо холодної пори року, коли відсутність опалення може призвести, зокрема, до вкрай негативних техногенних наслідків, наприклад, замерзання трубопроводів та інших інженерних комунікацій.

Одним з найперспективіших напрямів розв'язання цієї проблеми є впровадження комбінованих систем енергозабезпечення, які поєднують традиційні джерела енергії з відновлювальними, як то фотоелектричні панелі, вітрові турбіни, установки зберігання енергії (УЗЕ) та мікрокогенераційними установками, що забезпечують комбіноване виробництво електричної і теплової енергії. Такі мікроенергетичні системи дозволяють забезпечити резервне живлення в разі від'єднання будинку від мережі розподілу та також зменшити залежність від зовнішніх постачальників енергії. Крім того, важливим аспектом є інтеграція

систем керування енергоспоживанням, які дозволяють оптимізувати використання ресурсів у критичних умовах, зберігаючи енергію для найкритичніших потреб.

Іншим важливим фактором є підвищення енергоефективності самих будівель. Використання сучасних теплоізоляційних матеріалів, енергоефективних технологій та систем рекуперації тепла дозволяє значно знизити енергоспоживання, що є особливо важливим у умовах обмежених ресурсів. Також варто враховувати необхідність модернізації існуючих інженерних систем, які часто не відповідають сучасним вимогам щодо енергоефективності та надійності.

Таким чином, проблема енергозабезпечення житлових будинків у критичних умовах потребує комплексного підходу, що охоплює впровадження автономних джерел енергії, модернізацію інфраструктури та оптимізацію енергоспоживання. Розв'язання цієї проблеми дозволить забезпечити стабільне функціонування житлових комплексів у будь-яких умовах, що є важливим кроком у напрямку підвищення якості життя мешканців та зменшення ризиків, пов'язаних з енергетичними кризами.

Метою і завданнями дослідження є підвищення стійкості і гнучкості систем комбінованого електропостачання житлових комплексів та забезпечення можливості їх оперативного реконфігурування під час агресивних зовнішніх впливів за відсутності спеціалізованого персоналу.

Матеріал і результати досліджень. Для побудови системи електропостачання підвищеної стійкості і гнучкості вибрано дев'ятиповерховий житловий будинок з вбудованими нежитловими приміщеннями та підземним паркінгом, який є спорудою подвійного призначення – укриттям.

У будинку присутні 5 ВРП: ВРП-3.1 – житлове та загально будинкове навантаження; ВРП-3.2 – навантаження першого вбудованого супермаркету; ВРП-3.3 – навантаження другого вбудованого супермаркету; ВРП-3.4 – навантаження вбудованого магазину; ВРП-П – навантаження підземного паркінгу/укриття.

Таблиця 1 – Навантаження будинку

Найменування споживача	Нормальний режим		Острівний режим		Острівний режим, тривога	
	Р _р , кВт	W, кВт·год	Р _р , кВт	W, кВт·год	Р _р , кВт	W, кВт·год
ВРП-3.1	213,98	1371,05	84,91	494,80	54,74	290,90
ВРП-3.2 (супермаркет)	100,00	456,00	86,02	392,25	10,60	48,34
ВРП-3.3 (супермаркет)	100,00	456,00	86,02	392,25	10,60	48,34
ВРП-3.4 (магазин)	75,00	526,00	65,60	460,07	10,36	72,66
ВРП-П	80,00	547,88	70,40	482,13	70,28	513,68
Разом по будинку	568,98	3356,93	392,95	2221,51	156,58	973,91

В рамках виконаних досліджень розраховано навантаження будинку (табл. 1): житлове згідно табл. 3.1 [1], нежитлове (супермаркетів, магазину, паркінгу) згідно табл. 3.15 [1]. Також розраховано денне споживання житлового сегменту будинку ґрунтуючись на погодинному графіку навантаження вже функціонуючого багатоповислового житлового будинку, без вбудованих приміщень. Денне споживання магазинів та паркінгу розраховано на основі типових графіків навантаження. Для розрахунку автономного режиму залишено увімкненим лише пріоритетне навантаження (обладнання зв'язку та сигналізації, насоси; у квартирах: освітлення, холодильник, сигналізація, телевізор; магазини: вентиляція, стелажі, система охорони; паркінг: вентиляція, освітлення, пункт охорони). Для автономного режиму при оголошенні тривоги залишається увімкненим лише критичне навантаження (квартири:

холодильник, сигналізація; магазини: евакуаційне освітлення, система зв'язку).

Наступним кроком вибрано монокристалічні фотоелектричні панелі з високою енергопродуктивністю та ефективністю Q.PEAK DUO ML-G11S+ SERIES з врахуванням обмеженої площі даху та затінення від високих конструкційних елементів розташованих на даху. На рис. 1 наведено схему розташування фотоелектричних панелей у загальній кількості 284 шт., які приєднано до внутрішньої мережі житлового будинку трьома інверторами Deye SUN-50K-Do3 потужністю 50 кВт кожен.

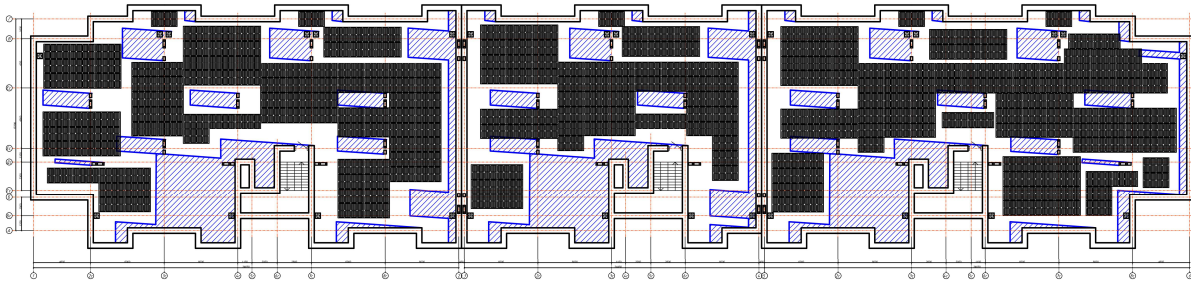


Рисунок 1 – Розміщення фотоелектричних панелей на даху будинку

За допомогою програмного забезпечення SAM 2023.12.17 (розповсюджується з відкритою ліцензією), розробленого американською Національною лабораторією відновлювальної енергії (NREL) [2], сформовано графік генерації електричної енергії за червень місяць 2022 року. За результатами співставлення денного графіка генерації зі споживанням в острівному режимі при оголошенні тривоги зрозуміло, що у період з 18:00 до 9:00 генерація менша за споживання, а у період з 10:00 до 17:00 генерація перевищує споживання (рис. 2).

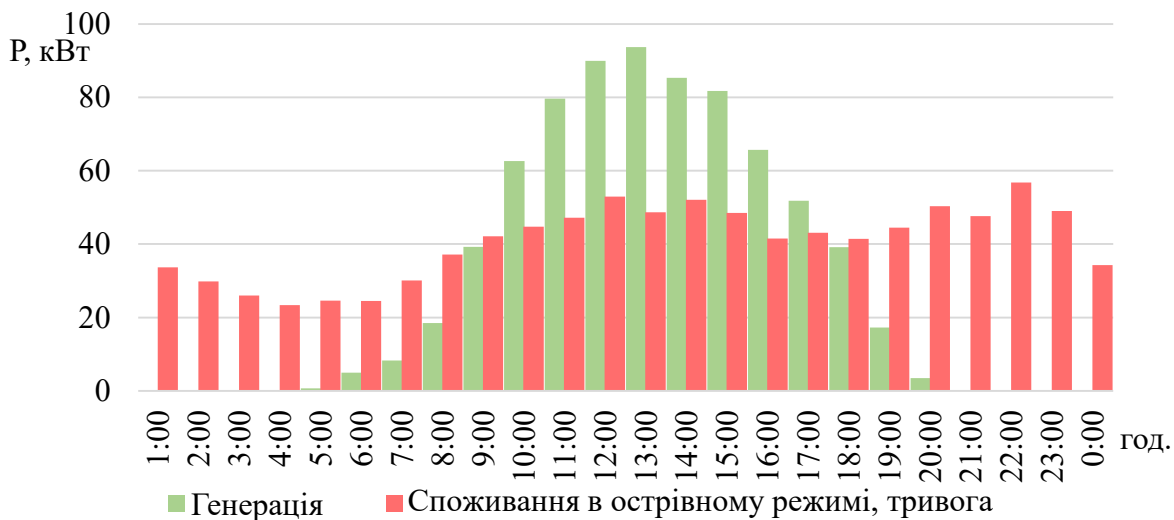


Рисунок 2 – Порівняння графіку генерації з графіком споживання в острівному режимі при оголошенні повітряної тривоги

Оскільки розрахункове значення генерованої фотоелектричною станцією (ФЕС) електричної енергії упродовж досліджуваної доби складає 742,2 кВт·год, а розрахункове значення електроспоживання критичного навантаження будинку в острівному режимі упродовж тієї ж самої доби, дорівнює 973,91 кВт·год (табл. 1), то робимо висновок, що запропонована конфігурація системи гарантованого живлення не забезпечить покриття критичного навантаження будинку. Отже, з метою покриття дефіциту гарантованого

електропостачання критичного навантаження будинку необхідно застосування додаткових генерувальних потужностей, наприклад, вітрових турбін, та УЗЕ.

З цієї метою здійснено вибір і розрахунок необхідної потужності і кількості УЗЕ. Враховуючи обмежену площу інсталяції УЗЕ (потребують приміщень, що забезпечують відповідний рівень безпеки) та підвищені вимоги до безпеки для застосування у житлових комплексах вибрано залізо-фосфатні (LiFePO_4) акумуляторні батареї, а саме – LP LiFePO_4 Battery HVM, ємністю 124,518 кВт·год, напругою 400 В, з максимальним струмом розряду 304 А. Під час розрахунку було враховано рекомендації виробника з експлуатації акумуляторних батарей зазначеного типу, а саме не допущення розряду більш ніж на 30% та заряду більш ніж на 80%, таким чином ефективна ємність акумуляторної стації становить – 62,26 кВт·год. Для забезпечення споживання в острівному режимі під час оголошення тривоги упродовж доби необхідне встановлення 16-ти акумуляторних батарей вибраного типу. Розрахована система акумуляування енергії забезпечить 10,76 год. роботи в острівному режимі, та 7,12 год – за нормального режиму функціонування житлового комплексу.

Побудова системи. Основним джерелом електропостачання будинку є зовнішні мережі оператора системи розподілу (ОСР). Для підвищення стійкості будинку пропонується впровадження: дахової фотоелектричної станції (ФЕС) та локальної УЗЕ. Під час тривалих вимкнень, а також в разі погіршення погодних умов, коли обсягів генерації та акумуляованої електроенергії не вистачає, досліджується застосування когенераційної установки Vitobloc 200 NG 260, потужністю 263 кВт [9] для гарантованого енергозабезпечення критичного навантаження будинку.

Ключовим елементом, який об'єднує всі компоненти мікросистеми, є мультипортовий конвертор (рис. 3) [6, 7], який має порти як змінного струму (для приєднання навантаження та установок на змінному струмі), так і постійного струму (для інтегрування мікрогенерувальних установок на постійному струмі до мережі змінного струму).

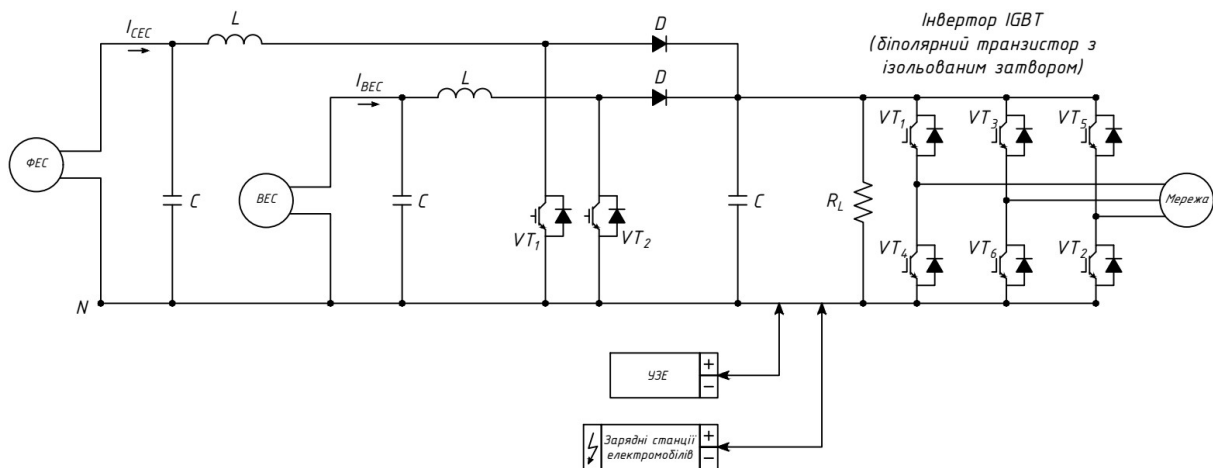


Рисунок 3 – Схема мультипортового конвертора. Авторське право [8]

Такий пристрій забезпечить можливість оперативного та безпечного реконфігурування системи внутрішнього електропостачання житлового комплексу під час агресивних зовнішніх впливів за відсутності спеціалізованого персоналу.

Висновок. Запропонована система з підвищення стійкості та гнучкості енергозабезпечення житлових комплексів забезпечує цілодобове електропостачання критичного навантаження будинку в острівному режимі під час оголошення повітряної тривоги ($P = 156,58$ кВт, $A = 973,91$ кВт·год) від дахової ФЕС та УЗЕ. Для покриття навантаження в автономного режимі ($P = 392,95$ кВт, $A = 2221,51$ кВт·год) необхідно використовувати додаткові джерела.

У перспективі досліджується застосування електромобілів разом із інфраструктурою зарядних пунктів електромобілів, як додаткове джерело енергії.

Список використаних джерел

1. ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 40 с.
2. System Advisor версії 2023.12.17 (SAM 2023.12.17). Національна лабораторія відновлюваної енергетики. Голден, Колорадо. <https://sam.nrel.gov> (13.02.2025).
3. Правила улаштування електроустановок. Київ: Міненерговугілля України, 2017. – 617 с.
4. ДБН В.2.2-41:2019 Висотні будівлі. Основні положення. Київ, Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2019, С. 47-49.
5. ДБН В.1.2-7-2008. Основні вимоги до будівель і споруд. Пожежна безпека. Вид.офіц. Київ: Держстандарт України
6. Sam Harrison, Bartosz Soltoswski, Antonio Pepiciello, Andres Camilo Henao, Ahmed Y. Farag, Mebtu Beza, Lie Xu, Agustí Egea-Alvarez, Marc Cheah-Man'ê, Oriol Gomis-Bellmunt (2024). Review of multiport power converters for distribution network applications. Elsevier.
7. Ahmed Yahia, Farag Abdelfattah, Paolo Mattavelli, Ruzica Cvetanovic, Khaled Awadallah Ahmed Mohamed (UNIPD), Martí Domínguez (UPC), Mohammed Debbat (IREC) (2024). Modelling and control of LV multiport converters. iPlug.
8. Hedra Mahfouz, Khairy Sayed, Ahmed G. Abo-Khalil, Abdulaziz Almutairi (2021). Multi-Port PWM DC-DC Power Converter for Renewable Energy Applications.
9. Сучасні кліматичні рішення компанії Viessmann | Viessmann UA. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/porady/tekhnolohiya-i-systemy/teploelektrotsentrali.html> (21.04.2025).

Науковий керівник: к.т.н., доцент О.В. Коцар

UDC 121.31

Nazar Polishchuk, master student,

Power Supply Department of

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

INCREASING THE RESILIENCE AND FLEXIBILITY OF COMBINED POWER SUPPLY SYSTEMS FOR RESIDENTIAL COMPLEXES

Abstract. *The article investigates ways to increase the sustainability and flexibility of combined power supply systems for residential complexes, in particular, in the face of aggressive external influences. The dependence of modern residential complexes on centralized power supply is analyzed and technical solutions based on combined microenergy systems that combine photovoltaic and wind power plants, energy storage facilities, microcogeneration units, and electric transport infrastructure are proposed. Using the example of a nine-story residential building, the paper presents a methodology for identifying priority and critical loads, selecting equipment, and developing power supply schemes that are characterized by the use of multi-port converters to facilitate the integration of microgenerating units and loads and safe reconfiguration of the microsystem in the absence of qualified personnel, as well as the use of electric vehicles to cover energy shortages. The proposed combined power supply system provides reliable coverage of priority and critical loads of the residential complex in an island mode, in particular, during air attacks and other aggressive external influences.*

Key words: residential complex, sustainability improvement, combined power supply system, load, consumption, solar panel, battery.

References

1. DBN B.2.5-23:2010 Engineering equipment of buildings and structures. Design of electrical equipment of civilian objects. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine, 2010. 18 p., 40 p.
2. System Advisor version 2023.12.17 (SAM 2023.12.17). National Renewable Energy Laboratory. Golden, Colorado. <https://sam.nrel.gov> (13.02.2025).
3. Rules for the installation of electrical installations. Kyiv: Ministry of Energy and Coal Industry of Ukraine, 2017. 57-66 pp., 617 p.
4. DBN B.2.2-41:2019 High-rise buildings. Main provisions. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, Housing and Communal Services of Ukraine, 2019, 47-49 p.
5. DBN V.1.2-7-2008. Basic requirements for buildings and structures. Fire safety. Published by the official. Kyiv: State Standard of Ukraine.
6. Translated with www.DeepL.com/Translator (free version) Sam Harrison, Bartosz Soltoswski, Antonio Pepiciello, Andres Camilo Henao, Ahmed Y. Farag, Mebtu Beza, Lie Xu, Agustí Egea-Alvarez, Marc Cheah-Man'ee, Oriol Gomis-Bellmunt (2024). Review of multiport power converters for distribution network applications. Elsevier.
7. Ahmed Yahia, Farag Abdelfattah, Paolo Mattavelli, Ruzica Cvetanovic, Khaled Awadallah Ahmed Mohamed (UNIPD), Martí Domínguez (UPC), Mohammed Debbat (IREC) (2024). Modelling and control of LV multiport converters. iPlug.
8. Hedra Mahfouz, Khairy Sayed, Ahmed G. Abo-Khalil, Abdulaziz Almutairi (2021). Multi-Port PWM DC-DC Power Converter for Renewable Energy Applications.
9. Modern climate solutions by Viessmann | Viessmann UA. URL: <https://www.viessmann.ua/uk/porady/tekhnohiya-i-systemy/teploelektrotsentrali.html> (21.04.2025).

Scientific supervisor: Cand.Tech.Sc., Associate Professor Oleg Kotsar

УДК 621.311.22

Х.В. Сіваченко, магістрант
О.В. Бориченко, канд. техн. наук., доцент, завідувач кафедри електропостачання
Кафедра електропостачання
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ТЕПЛОВІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЯК ДЖЕРЕЛО ДРІБНОДИСПЕРСНОГО ПИЛУ: ВИКЛИКИ ТА ШЛЯХИ ОЧИЩЕННЯ

Анотація. У статті розглядається проблема забруднення атмосферного повітря твердими частинками PM2.5 та PM10, особливо у зимовий період в Україні та Європі. Проаналізовано фізико-хімічні характеристики частинок, їхнє походження внаслідок спалювання вугільного палива на теплових електростанціях, а також первинні та вторинні механізми утворення. Особливу увагу приділено методам моніторингу (зокрема гравіметричному аналізу) та ефективним технологіям очищення викидів, серед яких виокремлюються рукавні фільтри.

Ключові слова: PM2.5, PM10, забруднення повітря, тепла електростанція (ТЕС), гравіметричний аналіз, рукавний фільтр, вторинні аерозолі, викиди, фільтрація.

Вступ. У багатьох регіонах світу зима - це час поганої якості повітря, насамперед через збільшення використання індивідуальних та централізованих систем опалення. Як наслідок, повітря містить підвищені концентрації як твердих частинок (PM10 і PM2.5), так і газоподібних забруднювачів через «низькі» викиди (на висоті до 40 м) і «високі» викиди (вище 40 м над рівнем землі). Взимку підвищений рівень забруднення часто посилюється метеорологічними умовами, зокрема температурою повітря, тиском, швидкістю повітря, напрямком вітру та тепловою інверсією, яка утримує забруднюючі речовини ближче до землі. У Києві, зокрема, повітря дуже забруднене протягом більшої частини зими через інтенсивне використання теплової електростанції (Трипільська ТЕС), індивідуальних котелень та транспортних викидів, які посилюються несприятливими погодними умовами.

Ситуація із забрудненням PM2.5 та PM10 в Україні та Європі. Проблема забруднення PM2.5 та PM10 особливо гостро постає взимку, коли збільшуються викиди від опалювальних систем. На прикладі карти забруднення в Україні (рис. 1) видно, що концентрації PM2.5 у центральних регіонах, включно з Києвом, сягають 80–200 мкг/м³, а PM10 – 40–160 мкг/м³ (дані Ventusky [1], 09.03.2025). Це значно перевищує норми ВООЗ (10 мкг/м³ для PM2.5 і 20 мкг/м³ для PM10, річний середній показник). Схожа ситуація спостерігається і в Європі: на карті (рис. 2) видно високі концентрації PM2.5 (100–200 мкг/м³) і PM10 (80–160 мкг/м³) у промислових регіонах Центральної Європи, таких як Польща, Угорщина та північ Італії (дані Ventusky, 01.01.2025).



Рисунок 1 – Карта забруднення PM2.5 та PM10 в Україні (дані Ventusky, 09.03.2025).

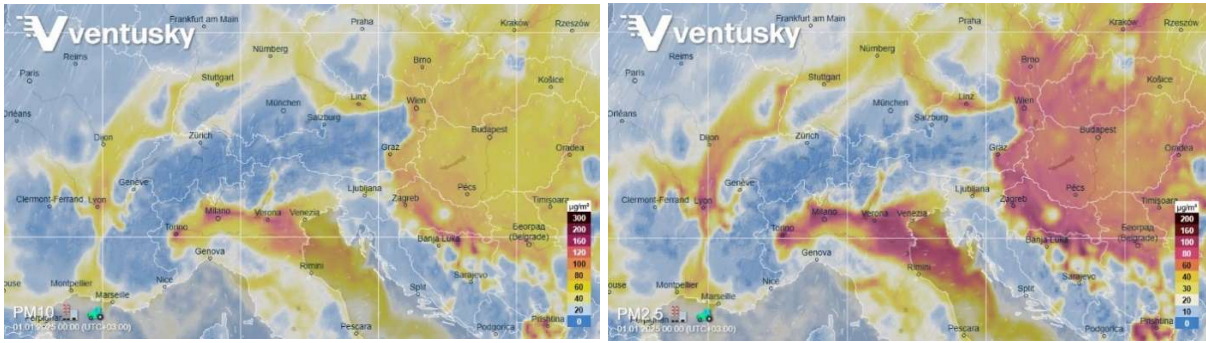


Рисунок 2 – Карта забруднення PM2.5 та PM10 у Європі (дані Ventusky, 01.01.2025)

Природа дрібних загроз: фізичні та хімічні характеристики PM10 і PM2.5. Тверді частинки (PM) є складною сумішшю дрібних твердих частинок і рідких крапель, що зависають у повітрі. PM2.5 і PM10 відрізняються за розміром, складом і впливом на навколишнє середовище та здоров'я людини.

PM2.5 – це дрібні тверді або рідкі частинки з аеродинамічним діаметром 2,5 мікрметра або менше, що приблизно в 30 разів менше діаметра людської волосини. Вони не мають єдиної хімічної формули, оскільки є гетерогенною сумішшю різних компонентів, таких як сульфати, нітрати, амоній, чорний вуглець, органічні хімічні сполуки та слідові метали, наприклад свинець і кадмій [2]. Завдяки своєму малому розміру PM2.5 можуть залишатися в атмосфері тривалий час і проникати глибоко в дихальну систему людини.

PM10 включає частинки з аеродинамічним діаметром 10 мікрметрів або менше, що приблизно дорівнює розміру пилкової зернини. Як і PM2.5, вони є гетерогенною сумішшю, що складається з грубіших компонентів, таких як пил, пісок, попіл, а також дрібніших частинок, що включають сульфати, нітрати, органічні сполуки, чорний вуглець і метали, наприклад залізо, алюміній і магній. PM10 зазвичай осідає швидше, ніж PM2.5, через більший розмір, але все ще може проникати в верхні дихальні шляхи, спричиняючи подразнення та інші проблеми зі здоров'ям.

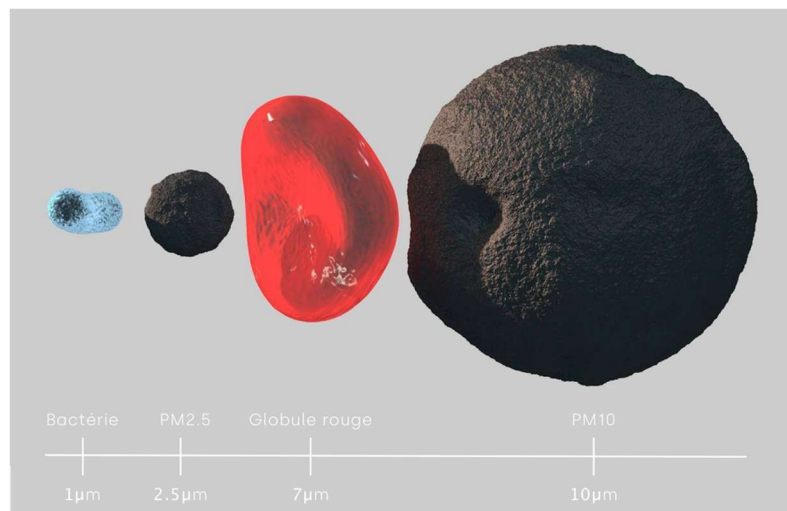


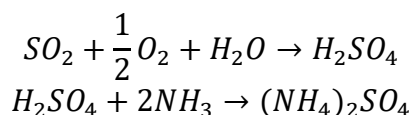
Рисунок 3 – Порівняння розмірів частинок: Бактерія (1 мкм), PM2.5 (2.5 мкм), Еритроцит (7 мкм), PM10 (10 мкм) [3].

Механізми та джерела утворення твердих частинок PM2.5 та PM10 з теплових електростанцій. Тверді частинки PM2.5 та PM10 утворюються на теплових електростанціях (ТЕС) через низку первинних і вторинних механізмів, пов'язаних зі спалюванням викопного

палива, такого як вугілля, мазут або природний газ. Первинні джерела включають золу та сажу, що утворюються безпосередньо під час згоряння палива, тоді як вторинні частинки формуються через хімічні реакції в атмосфері за участю газів-попередників, таких як діоксид сірки (SO_2), оксиди азоту (NO_x) та аміак (NH_3).

Первинні частинки PM_{10} на ТЕС здебільшого складаються із золи, що утворюється внаслідок спалювання вугілля, яке містить мінеральні домішки, такі як оксиди кремнію (SiO_2), алюмінію (Al_2O_3) та заліза (Fe_2O_3). Ці частинки мають більший розмір і часто осідають ближче до джерела викиду. $\text{PM}_{2.5}$, навпаки, переважно утворюється через вторинні процеси, коли гази, викинуті ТЕС, вступають у реакції в атмосфері.

Вторинне утворення, наприклад, діоксиду сірки (SO_2) окислюється до сірчаної кислоти (H_2SO_4), яке потім реагує з аміаком (NH_3), утворюючи сульфат амонію ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$), що є основним компонентом $\text{PM}_{2.5}$:



Цей процес залежить від таких факторів, як сонячне світло, вологість, температура та стабільність атмосфери. Крім того, оксиди азоту (NO_x), що також викидаються ТЕС, можуть утворювати нітратні частинки, а леткі органічні сполуки (ЛОС), які виділяються при неповному згорянні палива, сприяють утворенню органічних аерозолів, що входять до складу $\text{PM}_{2.5}$ [2].

Основними джерелами викидів $\text{PM}_{2.5}$ та PM_{10} на ТЕС є процеси спалювання палива, які залежать від типу палива та технології. Вугільні ТЕС є найбільшими джерелами через високий вміст сірки та золи у вугіллі, тоді як мазут сприяє утворенню сажі та органічних аерозолів. Природний газ, хоч і продукує менше первинних частинок, сприяє вторинному утворенню $\text{PM}_{2.5}$ через викиди NO_x та ЛОС. Ефективність технологій очищення, таких як електростатичні осаджувачі чи тканинні фільтри, також відіграє ключову роль у зменшенні викидів.

Таблиця 1. Джерела утворення твердих частинок залежно від типу палива [4]

Тип палива	Основні джерела $\text{PM}_{2.5}$ / PM_{10}	Вміст золи (%)	Основні хімічні компоненти РМ
Кам'яне вугілля	Зола, леткі органічні речовини, $\text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ (вторинні сульфати), $\text{NO}_x \rightarrow \text{NO}_3^-$	10 – 30	Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, NH_4NO_3
Буре вугілля	Зола, вища леткість $\rightarrow$ більше вторинних частинок	15 – 45	Кальцій, сірка, кремній, вторинні аерозолі
Мазут	Сульфати, зольні метали (Ni, V), неповне згоряння	0.05 – 0.2	NiO , V_2O_5 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
Природний газ	Майже відсутні первинні РМ, вторинні – переважно нітрати через NO_x	< 0.01	NH_4NO_3 , невелика кількість сажі при неповному згорянні

Для ефективного контролю рівнів забруднення атмосферного повітря, особливо у зонах впливу теплових електростанцій, важливо мати точні методи вимірювання концентрацій твердих частинок. Одним із таких методів є гравіметричний аналіз.

Вимірювальне обладнання. Гравіметричні пробовідбірники. Гравіметричний метод є поширеним методом вимірювання твердих частинок, коли повітря пропускається через фільтр, а збільшення ваги фільтра відповідає масі твердих частинок. Масову концентрацію РМ 2.5 та РМ 10 можна розрахувати за наступною формулою:

$$C = \frac{(W_2 - W_1) \times 10^6}{V \times t}; \quad (1)$$

де, C – концентрація PM2.5 або PM10 (мкг/м³); W_2 – остаточна вага фільтра після вибірки в грамах; W_1 початкова вага фільтра перед вибіркою у грамах; V – об'єм повітря, відібраного в м³; t – час дискретизації в годинах.

Цей підхід дає більш детальне розуміння методів вимірювання PM2.5 та PM10, а саме: як інтерпретувати дані, отримані в процесі гравіметричного відбору проб повітря.

Окрім моніторингу, важливим напрямом боротьби з твердими частинками є їх фільтрація безпосередньо на джерелі викиду. Найбільш доцільною технологією очищення газів у ТЕС є рукавні фільтри.

Рукавний фільтр: Конструкція, принцип дії та призначення. Рукавні фільтри є одним з найефективніших засобів очищення газів від твердих частинок (пилу, золи, аерозолів), широко застосовуються в енергетиці, металургії, цементній промисловості, хімічному виробництві тощо. Конструкція установки є відносно простою, однак основною складністю залишається забезпечення достатнього простору для розміщення обладнання через його значні габарити.

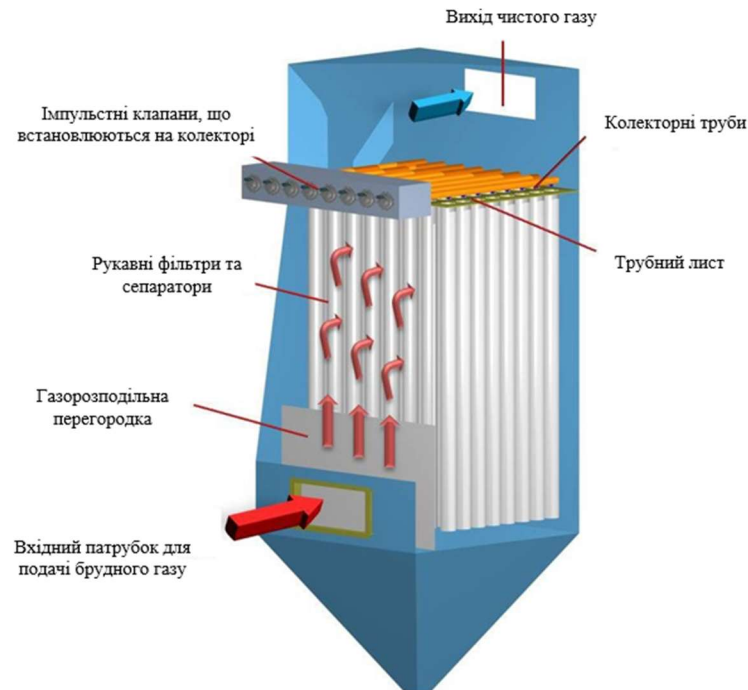


Рисунок 4 – Схема установки очищення вихлопних газів [5]

Основними елементами рукавного фільтра є:

- корпус фільтра, який забезпечує герметичність і напрямок потоку газу;
- фільтрувальні рукави (зазвичай виготовлені з тканин або нетканих матеріалів), які затримують пил;
- система регенерації (механічне струшування, імпульсне продування повітрям або зворотний потік газу), яка очищає рукава від накопичених частинок;
- колектори очищених газів і бункери для збору пилу;
- система подачі сирого газу та автоматизація управління процесом.

Принцип дії установки полягає в наступному: пилогазова суміш потрапляє у фільтр, де проходить через пористу структуру фільтрувального рукава. Частинки пилу осідають на зовнішній або внутрішній поверхні (залежно від конфігурації), а очищене повітря або газ виходить з фільтра. Після накопичення шару пилу спрацьовує автоматична система очищення, яка видаляє осад з фільтруючого матеріалу в бункер. Процес регенерації не заважає

безперервній роботі фільтра. Рукавні фільтри використовуються для очищення промислових газів від твердих частинок з метою зменшення викидів у навколишнє середовище, захисту обладнання від абразивного зносу та забезпечення відповідності екологічним нормам.

Підключення рукавного фільтра на ТЕС. Димохід від котла (або печі) до димової труби на електростанції, як правило, використовує систему рукавних фільтрів. Гарячі димові гази з твердими частинками після згоряння проходять через економайзер або інше обладнання для рекуперації тепла, перш ніж потрапити до рукавного фільтра в ізольованих каналах [6]. На цьому етапі газ зазвичай охолоджується до температури менше 250°C, щоб уникнути термічної деградації рукавних фільтрів. Після проходження через пиловловлюючі тканинні фільтрувальні мішки на зовнішній поверхні, забруднений газ потрапляє в корпус рукавного фільтра. Пройшовши через внутрішню частину мішка, очищене повітря безпечно виводиться з труби в атмосферу. Пил виводиться з бункерів під фільтрами за допомогою гвинтових конвеєрів або обертових клапанів. Вентилятор з примусовою тягою (ID) створює регульоване розрідження на виході, яке приводить в рух всю систему і забезпечує вільний потік через котел, фільтри і з димоходу.

Таким чином, тверді частинки PM2.5 та PM10, що утворюються внаслідок роботи теплових електростанцій, становлять серйозну загрозу як для довкілля, так і для здоров'я населення. Ефективна боротьба з цим явищем включає як постійний моніторинг концентрацій забруднювачів за допомогою гравіметричних методів, так і впровадження технологій очищення, таких як рукавні фільтри. Комплексний підхід дозволяє не лише зменшити шкідливі викиди, а й досягти відповідності екологічним нормам.

Список використаних джерел

1. Ventusky – Weather Forecast Maps. Ventusky – Wind, Rain and Temperature Maps [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ventusky.com/> (дата звернення: 25.04.2025).
2. J. I. Steinfeld, "Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change," Environment: Science and Policy for Sustainable Development, vol. 40, no. 7, 1998. doi: 10.1080/00139157.1999.10544295.
3. R-PUR, "Easily understand air pollution: PM10 particles," [Online]. Available: <https://www.r-pur.com/en/blogs/air/comprendre-la-pollution-de-l-air-les-particules-fines-pm10>. [Accessed: Apr. 25, 2025].
4. Y. L., X. Z., and J. W., "Efficient Removal of Organic Pollutants Using a Magnetic Activated Carbon Composite," ACS Omega, vol. 6, no. 32, 2021. [Online]. Available: <https://pubs.acs.org/doi/epdf/10.1021/acsomega.1c03187>. [Accessed: Apr. 24, 2025].
5. Jet pulse bag filter: 6 main components characteristics and 5 common problems and handling measures [Електронний ресурс] // Hengke Filter. – Режим доступу: <https://hengkefilter.com/jet-pulse-bag-filter-6-main-components/> (дата звернення: 24.04.2025).
6. Protsko I. Title of the article // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 808. – Article number: 012017. – DOI: 10.1088/1755-1315/808/1/012017.
7. W. Zhao, Y. Cheng, Z. Pan, K. Wang, and S. Liu, "Gas diffusion in coal particles: A review of mathematical models and their applications," Fuel, vol. 252, pp. 77–100, 2019.

H.V. Sivachenko, Master student
O.V. Borychenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department
of Power Supply
Department of Power Supply
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

THERMAL POWER PLANTS AS A SOURCE OF FINE DUST: CHALLENGES AND WAYS OF CLEANING

Abstract. *This article addresses the issue of air pollution by PM_{2.5} and PM₁₀ particles, especially during winter in Ukraine and Europe. It analyzes the physical and chemical properties of particulate matter, their formation due to fossil fuel combustion at thermal power plants, and both primary and secondary emission mechanisms. Particular attention is paid to air quality monitoring methods (especially gravimetric analysis) and effective emission reduction technologies, with a focus on baghouse filters.*

Keywords: *PM_{2.5}, PM₁₀, air pollution, thermal power plant (TPP), gravimetric analysis, baghouse filter, secondary aerosols, emissions, filtration.*

УДК: 620.92

С.О. Ярошук, магістрант
О. В. Бориченко, канд. техн. наук., доцент,
завідувач кафедри електропостачання
Кафедра електропостачання
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

РОЛЬ ГНУЧКОГО ПОПИТУ (DEMAND RESPONSE) У ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ: МІЖНАРОДНИЙ ДОСВІД І МОЖЛИВОСТІ ДЛЯ УКРАЇНИ

Анотація. Програми реагування на попит (Demand Response, DR) заохочують споживачів змінювати споживання електроенергії у відповідь на зміну умов постачання або цінових сигналів. DR все частіше розглядається як ресурс для забезпечення надійності та ефективності енергетичних систем, особливо у зв'язку зі збільшенням частки відновлюваної енергії. Це дозволяє інтегрувати змінні джерела (сонячну та вітрову енергію), зменшуючи потребу в традиційних пікових генераторах і сприяючи декарбонізації. У статті узагальнено міжнародний досвід (США, ЄС, Китай, Індія, Бразилія), розглянуто технічний потенціал ДР в Україні, розраховано ефект від його впровадження та запропоновано дорожню карту адаптації ДР до українських реалій.

Ключові слова: гнучкий попит, Demand Response, декарбонізація, енергетична гнучкість, електрифікація, ВДЕ

Вступ. У контексті глобального прагнення до кліматичної нейтральності одним із ключових викликів є інтеграція великої кількості відновлюваної енергії в енергетичні системи, що вимагає рішень для забезпечення гнучкості. Одним із таких інструментів є гнучкий попит (Demand Response, DR), яке є здатністю зменшувати або змінювати споживання енергії контрольованим чином у відповідь на сигнали від системного оператора або ринку.

У розвинутих країнах Demand Response вже інтегрований на ринки електроенергії та активно використовується для збалансування попиту та пропозиції, зниження пікових навантажень та скорочення викидів парникових газів. Програми DR заохочують споживачів прийняти адаптивну поведінку, яка дозволяє енергосистемі уникнути використання вуглецевих резервних потужностей.

Однак у багатьох країнах, що розвиваються, включно з Україною, потенціал DR залишається нереалізованим. Це пов'язано з відсутністю відповідної нормативно-правової бази, недостатньою цифровізацією та відсутністю ринку послуг гнучкості.

Аналіз останніх досліджень, у тому числі ESMAP (2024) [1], IEA (2023) [2] показує значний потенціал DR у зменшенні викидів і підвищенні надійності системи. Проте питання адаптації цих підходів до українських реалій з урахуванням викликів воєнного часу та необхідності відбудови інфраструктури залишаються відкритими.

Мета та завдання статті – дослідження потенціалу гнучкого реагування на попит як інструменту декарбонізації енергетичних мереж. Необхідно систематизувати досвід різних країн у DR, а також оцінити доцільність його впровадження в Україні. При цьому враховуватимуться особливості національної енергосистеми, процеси цифровізації та плани відновлення інфраструктури. Саме інтеграція гнучкого попиту в поєднанні з ВДЕ та заходами з енергоефективності відкриває додаткові перспективи для посилення надійності, гнучкості та стійкості енергетичного сектору України до зміни клімату.

Матеріал і результати досліджень було отримано застосуванням методу системного аналізу інформації з відкритих джерел щодо окресленої проблеми, а також методів

порівняння, класифікації, узагальнення й аналітичного синтезу. Основою дослідження слугували наукові публікації, офіційні звіти міжнародних організацій (IEA, ESMAP, World Bank), нормативні документи та статистика українських і зарубіжних енергетичних органів.

1. Концепція та переваги гнучкого попиту

Гнучкий попит (DR) передбачає регулювання споживання енергії кінцевими споживачами відповідно до потреб енергосистеми, наприклад, шляхом перенесення пікового навантаження на більш дешеві та низьковуглецеві джерела енергії. DR сприяє інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна та вітрова енергія, зменшуючи потребу в резервній генерації на основі викопного палива, а також підвищує стабільність та надійність енергосистеми.

Ключові переваги Demand Response в процесі карбонізації:

- стабілізація енергосистеми – DR згладжує коливання попиту, зменшуючи навантаження на пікові вугільні та газові електростанції;
- енергоефективність – оптимізація споживання знижує загальний попит, що призводить до скорочення викидів парникових газів;
- підтримка електрифікації – DR надає можливість ефективно управляти зростанням попиту на електроенергію в електрифікованих секторах (опалення, транспорт) шляхом зменшення пікових навантажень [3].

Гнучкий попит є важливим елементом Європейського зеленого курсу, метою якого є досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року [1]. У цьому контексті електрифікація кінцевих споживачів призводить до значного збільшення навантаження на енергосистему, що вимагає використання гнучких механізмів регулювання попиту для забезпечення балансування мережі.

2. Цілі гнучкого попиту

Для глибшого усвідомлення значення управління попитом (DR) важливо визначити його завдання з огляду на функціональні особливості енергетичної системи: гарантування безперебійного постачання енергії, стабільність мережі та підтримка декарбонізації.

Енергетичний баланс	Забезпечення енергією з найменшими витратами	Максимальна корисність для споживачів завдяки оптимальному узгодженню попиту та пропозиції	Доступність Задоволення системних потреб за менші кошти Надійність Зменшення відключень системи Декарбонізація Сприяння більшому проникненню відновлюваної енергетики
Забезпечення потужності	Адекватність потужності	Задоволення потреб системи при пікових навантаженнях, зниження ймовірності втрати навантаження (LOPL)	
Допоміжні послуги	Резервне забезпечення	Відновлення частоти після аварій або різких змін у генерації	
	Регулювання частоти	Реакція на короткотермінові коливання, спричинені змінами попиту чи генерації ВДЕ	
	Контроль напруги	Забезпечення якості постачання електроенергії відповідно до стандартів	
	Управління обмеженнями	Управління перевантаженнями мережі та обмеженнями, які в іншому випадку обмежують генерацію, замість модернізації або посилення мережі безпосередньо («недротова альтернатива»)	

Рисунок 1 – Головні цілі гнучкого попиту та їх вплив на енергетичну систему [1]

3. Класифікація інструментів DR

Інструменти гнучкого попиту (Demand Response) зазвичай класифікують на дві основні категорії – *implicit* (непрямі) та *explicit* (прямі). Вони відрізняються за механізмом взаємодії з користувачем, глибиною втручання та реакцією на сигнал із ринку або мережі.

- Implicit DR (непрямий DR) базується на цінових сигналах, які формуються наперед (наприклад, тарифи за часом використання). Споживачі змінюють поведінку добровільно відповідно до цінових індикаторів;
- Explicit DR (прямий DR) передбачає оперативне втручання оператора або агрегатора у навантаження споживача – як правило, за винагороду або контрактом.

Таблиця 1 – Класифікація інструментів Demand Response

Тип DR	Приклади	Мета	Вплив на систему
Implicit	Time-of-Use tariffs (TOU), Critical Peak Pricing (CPP)	Економічна реакція на зміну тарифів	Зниження навантаження в пікові години
Explicit	Interruptible Load, Bidding на ринку допоміжних послуг	Активне втручання для стабілізації	Реагування на аварійні або критичні події, підвищення гнучкості системи

Ця класифікація допомагає зрозуміти, як саме споживачі можуть брати участь у балансуванні енергосистеми. У розвинених країнах зазвичай одночасно діють обидва підходи — з акцентом на implicit DR для побутових і малих користувачів, та explicit DR для промислових і комерційних сегментів.

4. Міжнародний досвід використання гнучкого попиту

Рівень впровадження Demand Response значно відрізняється в різних країнах Європи, що пов'язано з різним регуляторним середовищем, цифровою інфраструктурою та ринковими характеристиками. Нижче наведено кілька прикладів успішного розгортання Demand Response на основі аналізу Chantzis et al. (2023) [3] та звіту ESMAP (2024) [1]. Вони демонструють різні масштаби впровадження, технологічні рішення та підходи до залучення споживачів. У Таблиці 2 показано, як країни з різними енергетичними моделями зрозуміли, як розширити гнучкий попит: від передових технологічних систем у Фінляндії до промислово-орієнтованих програм у Китаї та Індії.

Таблиця 2 – Реалізація DR у світі

Країна	Потужність DR (МВт)	Особливості реалізації
Фінляндія	200–600	Smart metering, балансування, активна участь домогосподарств
Франція	1366	45% mFRR забезпечується DR, участь великих споживачів
Велика Британія	1867	Побутові пілоти, цифрові платформи (Octopus Energy)
Китай	>10 000	Масове використання DR у промисловості, централізоване управління
Індія	~13 000	Скорочення пікового навантаження на 23% у промисловості
ПАР	500+	Агросектор, підтримка з боку держави та міжнародних донорів

5. Можливості гнучкого попиту в Україні

Оскільки Україна прагне гармонізувати свою енергетичну політику з ЄС та відновити енергетичну інфраструктуру після конфлікту, вона має унікальний контекст для реалізації

У 2021 році частка ВДЕ в українській генерації становила близько 8% [4], а згідно з планами, до 2030 року вона має зрости до 27% [5]. Водночас війна завдала серйозної шкоди енергетичній інфраструктурі, що підкреслило необхідність створення більш стійкої, цифрової та децентралізованої енергетичної системи. У цьому контексті DR може відігравати важливу роль у балансуванні енергосистеми та підтримці інтеграції ВДЕ.

Впровадження DR дозволить згладити коливання генерації з сонячних та вітрових джерел, зменшити потребу в дорогій піковій генерації та управляти новими навантаженнями, що виникають внаслідок електрифікації транспорту та опалення. Розвиток цифрової

інфраструктури, який вже відбувається в рамках післявоєнної модернізації, створює передумови для інтеграції інтелектуального обліку, платформ управління навантаженням та гнучких ринків, як у Фінляндії.

DR також добре поєднується із заходами з енергоефективності, як демонструє досвід Греції. Крім того, Україні необхідно адаптувати свою нормативно-правову базу до вимог Директиви (ЄС) 2018/2001, яка передбачає повну участь попиту на ринку електроенергії [6].

Однак, впровадженню DR в Україні перешкоджає декілька факторів. Серед них – недостатньо широке впровадження «розумного» обліку, недосконале регулювання участі споживачів у маневреності, обмеженість фінансових ресурсів на цифрові технології та висока частка викопних видів палива в структурі генерації [2].

Незважаючи на існуючі бар'єри, потенціал DR в Україні оцінюється приблизно у 2000 МВт, або близько 12% від пікового навантаження. Основні сегменти, де може бути впроваджено гнучке реагування на попит, показані в Таблиці 3.

Таблиця 3 – Орієнтовний потенціал DR в Україні

Сектор	Оцінений потенціал (МВт)	Коментар
Промисловість	~1200	Металургія, агросектор, цементні заводи
Комерційний сектор	~400	Торгові центри, офіси, склади
Побутовий сектор	~400	За умови впровадження smart metering
Разом	~2000	~12% від пікового навантаження

6. Розрахунок очікуваного ефекту від DR

Для оцінки ефективності впровадження гнучкого попиту в Україні використано орієнтовні дані щодо пікового навантаження та потенціалу зменшення споживання. Середнє пікове навантаження в енергосистемі України становить близько 16 000 МВт. Згідно з узагальненими оцінками, потенціал DR може сягати до 2000 МВт ($\approx 12,5\%$ піку). Припускаючи реалізацію лише 50% цього потенціалу, отримуємо 1000 МВт доступної потужності DR. Середня тривалість активації програм гнучкого попиту у пікові періоди становить приблизно 2 години. Якщо DR використовуватиметься протягом 200 днів на рік, отримаємо:

$$E = 1000 \text{ МВт} \times 2 \text{ год} \times 200 \text{ днів} = 400 \text{ ГВт/год.}$$

Таким чином, щорічне зменшення або перенесення навантаження може досягти 400 ГВт·год. Це відповідає річному споживанню електроенергії середнього українського міста. За середньою ціною електроенергії у пікові години (приблизно 5000 грн/МВт·год згідно з НКРЕКП), річна економія коштів на закупівлі електроенергії може сягнути 2 млрд грн. Екологічний ефект також суттєвий: зниження викидів CO_2 може становити до 320 тис. тонн на рік ($400 \text{ ГВт/год} \times 0,8 \text{ т } \text{CO}_2/\text{МВт}$ [7]), що еквівалентно викидам понад 140 тис. авто.

Отже, навіть часткове впровадження DR в Україні дозволяє досягти значного економічного та екологічного ефекту, підвищити гнучкість мережі та забезпечити стійкість у перехідний період енергетичної трансформації.

7. Рекомендації щодо політики для України

Для максимального використання потенціалу гнучкого попиту (DR) у декарбонізації енергосистеми України, необхідно застосовувати цілісний підхід. Рекомендовано: впроваджувати розумні лічильники, як це реалізовано у Фінляндії, що сприятиме підтримці імпліцитного DR; створювати ринки гнучкості, аналогічні британським, щоб стимулювати залучення до DR; започаткувати пілотні проекти, подібно до Кіпру, з метою тестування DR у житловому та промисловому секторах; узгоджувати політику з директивами Європейського Союзу, особливо з Директивою (ЄС) 2018/2001, що стосується інтеграції ВДЕ; організовувати навчання фахівців з метою ефективного впровадження DR, за зразком Греції; залучати фінансування від програм відновлення Європейського Союзу для модернізації інфраструктури.

Висновки. Гнучкий попит є ключовим елементом декарбонізації енергетичних систем,

забезпечуючи гнучкість для інтеграції ВДЕ, підтримки електрифікації та підвищення стійкості мережі. Міжнародний досвід Фінляндії, Франції, Великої Британії, Греції та Кіпру демонструє потенціал DR за наявності розумних лічильників, доступу до ринків і прогресивних політик. Для України DR відкриває трансформаційні можливості для відновлення декарбонізованої та стійкої енергосистеми, гармонізованої з цілями ЄС. Подолання інфраструктурних, регуляторних та економічних викликів дозволить Україні реалізувати кліматичні зобов'язання та забезпечити стає енергетичне майбутнє.

Список використаних джерел

1. World Bank, Harnessing the Potential of Flexible Demand Response in Emerging Economies, Washington, DC: ESMAP, 2024. [Online]. Available: <https://www.esmap.org/Harnessing-Flexible-Demand-Response>
2. International Energy Agency, Harnessing Energy Demand Restraint in Ukraine: A Roadmap, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/harnessing-energy-demand-restraint-in-ukraine-a-roadmap>
3. M. Chantzis, G. Floros and J. Vardakas, "The potential of Demand Response as a tool for decarbonization in the energy transition," Energy, vol. 278, Article ID 127853, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127853>
4. Ukraine's renewable energy sector before, during and after the war [Електронний ресурс] // Razumkov Centre. – 2023. – Режим доступу: <https://razumkov.org.ua/en/articles/ukraines-renewable-energy-sector-before-during-and-after-the-war>
5. Новий план: як Україна планує досягти 27% ВДЕ до 2030 року [Електронний ресурс] // Dixi Group. – 2024. – Режим доступу: <https://dixigroup.org/comment/novyj-plan-yak-ukrayina-planuye-dosyagty-27-vde-do-2030-roku/>
6. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj>
7. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 2: Energy, Geneva: IPCC, 2006. [Online]. Available: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>

S. O. Yaroshchuk, Master's student
O. V. Borychenko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Head of the Department of Power Supply
Department of Power Supply
National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**ROLE OF FLEXIBLE DEMAND RESPONSE IN THE DECARBONIZATION OF
ENERGY SYSTEMS: INTERNATIONAL EXPERIENCE AND OPPORTUNITIES FOR
UKRAINE**

Abstract. *Demand Response (DR) programs encourage consumers to change their electricity consumption in response to changing supply conditions or price signals. DR is increasingly seen as a resource for ensuring the reliability and efficiency of energy systems, especially as the share of renewable energy increases. It allows for the integration of variable sources (solar and wind energy), reducing the need for traditional peaking generators and contributing to decarbonization. The article summarizes international experience (USA, EU, China, India, Brazil), considers the technical potential of DR in Ukraine, calculates the effect of its implementation, and proposes a roadmap for adapting DR to Ukrainian realities.*

Keywords: *flexible demand, Demand Response, decarbonization, energy flexibility, electrification, RES*

УДК 621.311

І.І. Богойко, аспірант
Кафедра Електропостачання

РОЗВИТОК ЗАРЯДНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ: АНАЛІЗ ДОСВІДУ КРАЇН ЄС ТА ПЕРСПЕКТИВИ ДЛЯ УКРАЇНИ

Анотація. У статті розглянуто розвиток зарядної інфраструктури для електромобілів на прикладі країн Європейського Союзу та окреслено можливості її впровадження в Україні. Проаналізовано сучасний стан світового ринку електромобілів у 2024 році та виявлено основні проблеми, зокрема уповільнення темпів будівництва зарядних станцій. Розкрито особливості європейського досвіду, зокрема переважання середньошвидкісних зарядок і потребу в якісному оновленні інфраструктури. Окрема увага приділена українському законодавству, яке визначає поняття електрозарядної станції та регулює облік споживання електроенергії. Описано державні плани розвитку інфраструктури згідно з Енергетичною стратегією України до 2050 року.

Ключові слова: електромобільність, зарядна інфраструктура, енергетична стратегія, ВДЕ, комерційний облік, законодавство, час заряджання

Вступ. Електромобільність стала одним із ключових напрямів глобальної стратегії сталого розвитку, спрямованої на скорочення викидів парникових газів та зменшення залежності від викопного палива. Основою для широкого впровадження електротранспорту є наявність ефективної, доступної та екологічно безпечної зарядної інфраструктури.

У контексті євроінтеграції та реалізації цілей Енергетичної стратегії України до 2050 року виникає необхідність комплексного аналізу зарубіжного досвіду, оцінки національного потенціалу, а також розробки нормативно-технічних, економічних і математичних підходів до оптимального розгортання зарядних станцій.

Мета та завдання. Проаналізувати досвід ЄС у розвитку зарядної інфраструктури та визначити перспективи для України.

Матеріали і результати дослідження. На сучасному етапі розвитку 2024 рік виявився суперечливим для світового ринку електромобілів (рис. 1). Хоча продажі зросли на 25% порівняно з попереднім роком, темпи приросту сповільнилися, що викликає занепокоєння щодо досягнення стратегічних цілей електрифікації транспорту до 2030 та 2050 років [1].

Найвищу динаміку демонструє китайський ринок, зокрема за останній квартал 2024 року, коли було зафіксовано рекордні обсяги продажів електромобілів різних типів. Натомість у Європі спостерігається спад на рівні 3%, переважно через зменшення державної підтримки, зокрема скасування субсидій у Німеччині [1]. В Україні ж, попри складну ситуацію, кількість електромобілів продовжує зростати й наразі оцінюється на рівні близько 150 тисяч одиниць.

У таких умовах особливої ваги набуває необхідність перегляду стратегій стимулювання ринку EV з урахуванням як глобальних, так і регіональних викликів. У цьому контексті критично важливим є розвиток ефективної зарядної інфраструктури, яка має не лише відповідати темпам зростання кількості електромобілів, але й випереджати їх, забезпечуючи доступність, швидкість заряджання та інтеграцію з відновлюваними джерелами енергії. Формування національних планів дій, підтримка з боку держави та адаптація європейських практик є визначальними факторами для сталого розвитку електромобільності в Україні в найближчі роки.

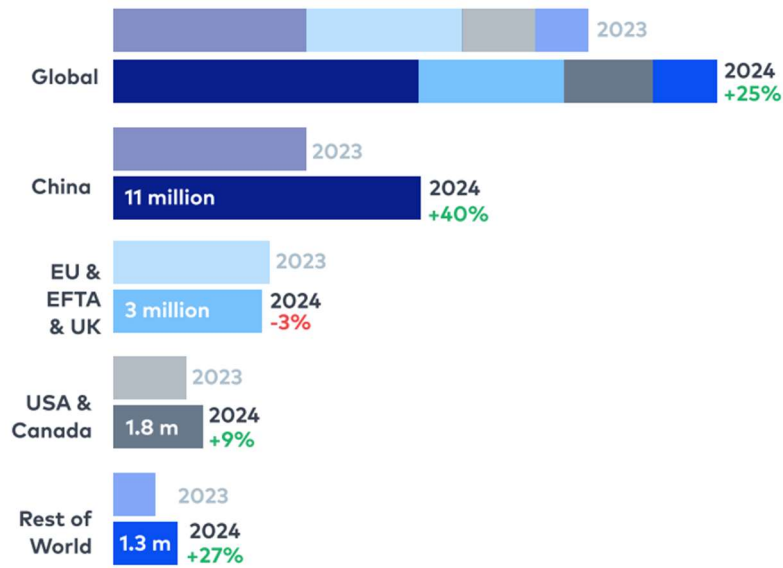


Рисунок 1 – Стан світового ринку електромобілів [1]

Одним із ключових викликів у розвитку електромобільності в Європі залишається недостатній темп розгортання зарядної інфраструктури (рис. 2). Для реалізації кліматичних цілей, зокрема в межах декарбонізації транспорту, Європа має досягти суттєвого приросту кількості зарядних точок до кінця поточного десятиліття. Однак поточні темпи встановлення зарядних станцій істотно не відповідають необхідному рівню [1].

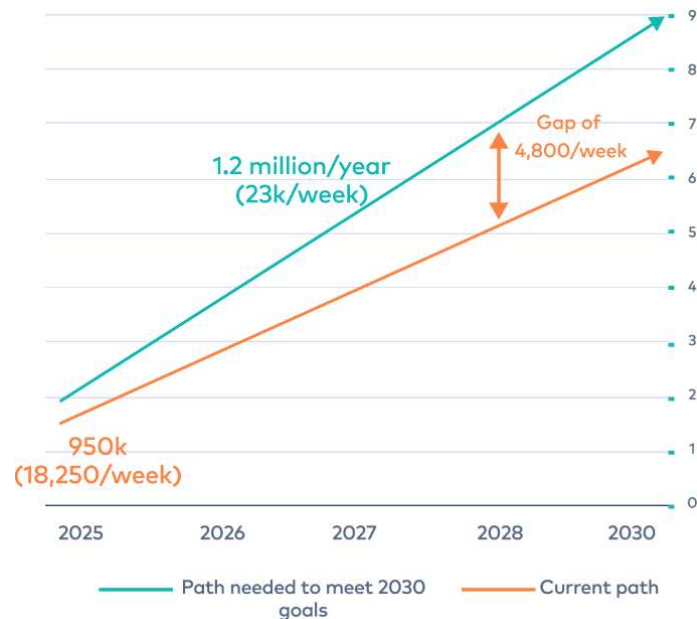


Рисунок 2 – Темпи встановлення зарядних станцій у Європі [1]

Існуюче відставання створює ризики для забезпечення доступності зарядної інфраструктури та може стати бар'єром для подальшого зростання парку електромобілів. Зафіксований темп встановлення зарядок у 2024 році демонструє суттєву різницю з прогнозованими орієнтирами, що вимагає активізації зусиль на рівні політики, інвестицій та стандартизації. Оптимізація цього процесу є критичною для досягнення цілей до 2030 року та підтримки зростання екологічного транспорту на континенті.

Європейський ринок зарядної інфраструктури демонструє переважання середньошвидкісних станцій (рис. 3), що відповідає потребам щоденного заряджання у міських умовах. Попри поступове зростання частки швидкісних і надшвидкісних зарядок, їх розгортання все ще обмежене через технічні, фінансові та мережеві бар'єри [1]. Варто зазначити, що створюється дисбаланс між зростаючим попитом на швидке заряджання та реальними можливостями його забезпечення. Для країн з розвинутою мережею електромобілів ключовим завданням стає не лише кількісне, а й якісне оновлення інфраструктури.

Водночас в Україні розвиток публічної зарядної мережі перебуває на початковому етапі: за останніми оцінками, на території країни функціонує близько 4800 публічних зарядних станцій. Це вимагає формування чіткої стратегії розвитку, орієнтованої на зростання частки високопродуктивних зарядок у поєднанні з модернізацією електромереж.



Рисунок 3 – Стан громадських зарядних станцій у Європі у 2024 році [1]

Зважаючи на вищезазначені тенденції у сфері електромобільності та необхідність масштабування зарядної інфраструктури, особливого значення набуває аналіз чинної нормативно-правової бази України, яка регламентує використання електротранспорту та діяльність зарядних станцій.

На законодавчому рівні поняття зарядної інфраструктури вперше чітко визначено у Законі України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами..» [3], де електрозарядна станція трактується як пристрій (пересувний чи стаціонарний), призначений для заряджання систем акумуляування електроенергії в електричних транспортних засобах різних типів, включно з плагін-гібридами та електробусами.

Крім того, у 2023 році було внесено відповідні зміни до Кодексу комерційного обліку електричної енергії (Постанова НКРЕКП №1495 від 15.08.2023) [4], якими офіційно доповнено визначення станції зарядки електромобілів як споживача електричної енергії, що надає послуги із заряджання. Таке уточнення є ключовим з огляду на формування правового поля для комерційного та технічного обліку електроенергії, яку споживають подібні об'єкти.

Оновлення законодавчої бази створює підґрунтя для подальшого розвитку галузі, однак для досягнення кліматичних та енергетичних цілей необхідне також формування цілісної стратегії, що охоплює стандартизацію обладнання, інтеграцію зарядних станцій у енергосистему та механізми стимулювання інвесторів.

У межах реалізації Енергетичної стратегії України до 2050 року Міністерством енергетики було запропоновано створення національної мережі зарядних станцій для електромобілів [5, 6]. Відповідно до проєкту Плану заходів, на першому етапі, реалізацію якого орієнтовно заплановано на 2026 рік, передбачено будівництво щонайменше 40 зарядних станцій великої потужності (понад 160 кВт) та 80 станцій середньої потужності (від 60 кВт) в обласних центрах і вздовж основних автомагістралей. Орієнтовна вартість першого етапу

проекту оцінюється у 1,5 мільярда гривень, а головним інвестором має стати ДП «НАЕК «Енергоатом».

У довгостроковій перспективі держава розраховує на створення в Україні розгалуженої зарядної інфраструктури, яка б забезпечувала співвідношення не більше ніж п'ять електромобілів на одну точку заряджання. При цьому відстань між станціями вздовж основних транспортних коридорів не повинна перевищувати 60 кілометрів [5, 6].

Розрахунок часу заряджання. Час заряджання електромобіля залежить від типу системи: on-board (вбудований зарядний пристрій у ТЗ) або off-board (зовнішня зарядна станція). Ці параметри визначаються потужністю джерела живлення та ефективністю системи [7]:

$$t_{\text{on-board}} = \frac{E_{\text{req}}}{\eta_{\text{on-board}} \cdot P_{\text{on-board}}} \quad (1)$$

$$t_{\text{off-board}} = \frac{E_{\text{req}}}{\eta_{\text{off-board}} \cdot P_{\text{off-board}}} \quad (2)$$

де E_{req} — необхідна енергія для заряджання батареї (кВт·год), $P_{\text{on/off-board}}$ — потужність зарядки (кВт), $\eta_{\text{on/off-board}}$ — ефективність зарядної системи, t — час заряджання (год).

Заряджання FCEV (електромобілів на водневих паливних елементах). У разі поєднання джерел живлення (зарядний пристрій + паливний елемент), час заряджання визначається сукупною потужністю [7]:

$$t = \frac{E_{\text{req}}}{(P_{\text{on-board}} + P_{\text{FuelCell}} \cdot \eta_{\text{FuelCell}}) \cdot \eta_{\text{on-board}}} \quad (3)$$

Ця модель дозволяє оцінити ефективність гібридних систем, які використовують як зовнішнє живлення, так і енергію від паливних елементів.

Оцінка сукупної потужності зарядної інфраструктури. Для прогнозування навантаження на інфраструктуру використовується проста модель [7]:

$$P_{\text{demand}} = n \cdot E_{\text{av}} \quad (4)$$

де n — кількість електромобілів, E_{av} — середнє споживання енергії на один ТЗ.

Ця модель є наближеною та не враховує часову динаміку, однак дозволяє сформулювати базовий прогноз для розміщення та розміру зарядних станцій.

Показник частки відновлюваної енергії в зарядній мережі. Для оцінки екологічної сталості зарядних станцій використовується такий показник [7]:

$$C_{\text{RE}} = \frac{E_{\text{RE}}}{E_t} \cdot 100 \quad (5)$$

де E_{RE} — обсяг енергії з відновлюваних джерел, E_t — загальне енергоспоживання.

Максимізація C_{RE} є ключовою умовою досягнення цілей сталого розвитку та зниження викидів CO_2 .

Оцінка рівня заряду батареї (SOC). Стан заряду батареї (State of Charge, SOC) є динамічним параметром, що описується інтегральним рівнянням [7]:

$$\text{SOC}(t) = \text{SOC}(t_0) + \frac{1}{Q_{\text{max}}} \int_{t_0}^t I(t) dt \quad (6)$$

де $SOC(t_0)$ — початковий рівень заряду, Q_{max} — максимальна ємність батареї, $I(t)$ — струм у момент часу t .

Правильна оцінка SOC забезпечує ефективне використання енергії та продовжує термін служби акумулятора.

Висновки. Проведений аналіз показує, що попри загальне зростання ринку електромобілів у світі, Україна стикається з низкою системних викликів у сфері розвитку зарядної інфраструктури. До основних з них належать недостатня кількість високопродуктивних станцій, обмежена законодавча визначеність на ранніх етапах і низький рівень залучення інвестицій у галузь.

Разом із тим, оновлення нормативно-правової бази, включення зарядних станцій до ключових документів енергетичного планування, а також застосування сучасних математичних моделей і стратегій дозволяють створити підґрунтя для ефективного та сталого розвитку електромобільності в Україні з орієнтацією на найкращі європейські практики.

Список використаних джерел

1. GridX, *European EV Charging Report 2025*. [Online]. URL: <https://www.gridx.ai/resources/european-ev-charging-report-2025> [Accessed: April 26, 2025].
2. ACEA – European Automobile Manufacturers' Association, *Charging Ahead: Accelerating the Rollout of EU Electric Vehicle Charging Infrastructure*, Automotive Insights report. [Online]. URL: <https://www.acea.auto/publication/automotive-insights-charging-ahead-accelerating-the-rollout-of-eu-electric-vehicle-charging-infrastructure/> [Accessed: April 27, 2025].
3. Закон України «Про деякі питання використання транспортних засобів, оснащених електричними двигунами, та внесення змін до деяких законів України щодо подолання паливної залежності і розвитку електрозарядної інфраструктури та електричних транспортних засобів». Затверджено президентом України 24 лютого 2023 року N 2956-IX. (дата звернення: 27.04.2025)
4. Постанова НКРЕКП «Про затвердження Кодексу комерційного обліку електричної енергії» № 311 від 14.03.2018. (дата звернення: 28.04.2025)
5. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (дата звернення: 27.04.2025)
6. Міністерство енергетики України. 2024. План заходів щодо реалізації Енергетичної стратегії України на період до 2050 року URL: https://mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/dodatok-do-proektu-rozporyadzhennya_0.pdf. (дата звернення: 27.04.2025)
7. S. Nasri, N. Mansouri, A. Mnassri, A. Lashab, J. Vasquez, and H. Rezk, “Global Analysis of Electric Vehicle Charging Infrastructure and Sustainable Energy Sources Solutions,” *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 4, p. 194, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/wevj16040194>.

Науковий керівник: д.т.н, професор Денисюк С. П.

UDC 621.311

Ihor Bohoiko, PhD student
Power Supply Department of
Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

DEVELOPMENT OF CHARGING INFRASTRUCTURE: ANALYSIS OF EU EXPERIENCE AND PROSPECTS FOR UKRAINE

Abstract. *The article examines the development of electric vehicle charging infrastructure using the example of European Union countries and outlines the possibilities for its implementation in Ukraine. The current state of the global electric vehicle market in 2024 is analyzed, with key challenges identified, particularly the slowdown in the construction of charging stations. The specifics of the European experience are highlighted, including the dominance of medium-speed chargers and the need for qualitative infrastructure renewal. Special attention is given to Ukrainian legislation, which defines the concept of an EV charging station and regulates electricity consumption metering. National infrastructure development plans are described in accordance with Ukraine's Energy Strategy until 2050.*

Key words. *electromobility, charging infrastructure, energy strategy, RES, commercial metering, legislation, charging time*

References

1. GridX, *European EV Charging Report 2025*. [Online]. Available: <https://www.gridx.ai/resources/european-ev-charging-report-2025> [Accessed: April 26, 2025].
2. ACEA – European Automobile Manufacturers' Association, *Charging Ahead: Accelerating the Rollout of EU Electric Vehicle Charging Infrastructure*, Automotive Insights report. [Online]. Available: <https://www.acea.auto/publication/automotive-insights-charging-ahead-accelerating-the-rollout-of-eu-electric-vehicle-charging-infrastructure/> [Accessed: April 27, 2025].
3. Law of Ukraine "On Certain Issues Regarding the Use of Vehicles Equipped with Electric Motors and Amendments to Certain Laws of Ukraine on Overcoming Fuel Dependence and the Development of EV Charging Infrastructure and Electric Vehicles", approved by the President of Ukraine on February 24, 2023, No. 2956-IX. [Accessed: April 27, 2025].
4. Resolution of the National Energy and Utilities Regulatory Commission of Ukraine "On Approval of the Electricity Commercial Metering Code", No. 311 dated March 14, 2018. [Accessed: April 28, 2025].
5. On Approval of the Energy Strategy of Ukraine for the Period Until 2050, Order of the Cabinet of Ministers of Ukraine, April 21, 2023, No. 373-r. [Online]. Available: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> [Accessed: April 27, 2025].
6. Ministry of Energy of Ukraine, *Action Plan for the Implementation of the Energy Strategy of Ukraine for the Period Until 2050*, 2024. [Online]. Available: https://mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/dodatok-do-proektu-rozporядzhennya_0.pdf [Accessed: April 27, 2025].
7. S. Nasri, N. Mansouri, A. Mnassri, A. Lashab, J. Vasquez, and H. Rezk, "Global Analysis of Electric Vehicle Charging Infrastructure and Sustainable Energy Sources Solutions," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 16, no. 4, p. 194, Mar. 2025. doi: <https://doi.org/10.3390/wevj16040194>.

Scientific supervisor: Dr. Tech. Science, Professor. Sergii Denysiuk

УДК 621.314

К.М. Гілевич, аспірантка, КПІ ім. Ігоря Сікорського
ORCID 0000-0001-9074-0683**КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ**

В умовах триваючої війни в Україні та її руйнівного впливу на енергетичну інфраструктуру, питання інтеграції активних споживачів до енергетичного ринку набуває надзвичайної ваги. З огляду на зростаюче значення відновлюваних джерел енергії для підвищення енергетичної стійкості та децентралізації енергосистем як стратегічної відповіді на воєнні загрози, актуалізується завдання залучення активних споживачів до функціонування енергетичного ринку. У цьому дослідженні фокус спрямовано на аналіз бізнес-моделей, які забезпечують залучення споживачів до процесів балансування між споживанням та генерацією електроенергії, що є критично важливим для забезпечення надійного енергопостачання в умовах воєнних дій та післявоєнної відбудови.

У представленій статті здійснено аналіз шести типових бізнес-моделей активних споживачів, а саме: «Локальна енергетична компанія», «Локальна енергетична компанія з використанням систем накопичення електроенергії», «Просюмер-агрегатор», «Участь агрегатора без контрагентів», «Колективне автоспоживання» та «Локальні тарифи на електроенергію». Досліджено їхню організаційну структуру, етапи взаємодії зі споживачами, засади здійснення фінансових розрахунків та умови завершення співробітництва. Особливу увагу приділено вивченню механізмів управління попитом, рівня гнучкості споживання енергії, ролі операторів систем розподілу, а також застосуванню цифрових технологій для обліку та керування енергоспоживанням.

За результатами проведеного дослідження встановлено, що основними характеристиками більшості розглянутих моделей є залучення споживачів до процесу балансування енергосистеми, стимулювання розвитку місцевої генерації енергії та заохочення активної участі через гнучкі тарифні механізми. Сформульовано рекомендації щодо можливостей впровадження моделей активного споживання в енергетичній системі України, зокрема наголошено на необхідності офіційного визнання ролі агрегаторів енергетичних послуг, створення правового підґрунтя для застосування динамічного ціноутворення, підтримки розвитку локальних енергетичних компаній та запровадження законодавчих норм для регулювання спільного використання енергії через розподільні мережі.

Активні споживачі розглядаються як ключовий фактор у переході до децентралізованої, екологічно стійкої та енергетично незалежної енергетичної системи, сприяючи інтеграції відновлюваних джерел енергії на місцевому рівні та оптимізації балансу енергетичної мережі. Отримані результати дослідження є важливою інформаційною базою для подальшого розроблення законодавчих та регуляторних ініціатив, спрямованих на активізацію участі громадян у розвитку енергетичних ринків та підтримку процесу енергетичної трансформації України.

Ключові слова: активний споживач, просюмер, агрегатор, керування попитом, розподільча мережа, локальна енергетична компанія, тарифи, ВДЕ, децентралізація енергетики, самоспоживання, мікромережа, система накопичення електроенергії, генерація, балансування.

Вступ

Руйнівні наслідки воєнних дій в Україні для енергетичної інфраструктури зумовлюють критичну потребу в пошуку прогресивних підходів до розбудови енергосистеми, здатної до стійкості та швидкої адаптації. Одним із перспективних напрямків є активне залучення споживачів до циклу виробництва, споживання та балансування електроенергії шляхом

імплементції новітніх бізнес-моделей. Це завдання є першочерговим як для забезпечення безперебійного енергопостачання в умовах воєнного стану, так і для майбутньої відбудови енергетичного комплексу країни [3].

Подальший розвиток децентралізованої енергетики в Україні вимагає перегляду та оновлення існуючої нормативно-правової бази, а також створення сприятливого середовища для активної участі споживачів, включаючи приватні домогосподарства та суб'єкти малого підприємництва, у процесах генерації електроенергії. Ключовими інструментами для досягнення цієї мети є механізми «зелених» тарифів, впровадження інтелектуальних систем обліку енергоресурсів та технологій акумулювання енергії.

Паралельно з цим виникає необхідність у проведенні глибокого аналізу різноманітних бізнес-моделей просюмеризму, що дозволить оцінити їхню дієвість у контексті зміцнення енергетичної незалежності територіальних громад, інтеграції відновлюваних енергетичних джерел та оптимізації роботи розподільних електричних мереж. Такий комплексний підхід сприятиме формуванню надійних засад для сталого розвитку енергетичної системи України в майбутньому [1,2].

Мета роботи. Провести аналіз бізнес-моделей активних споживачів, які потребують регулювання попиту та інтегровані з розподільчими мережами, а також розробка пропозицій щодо їхньої адаптації в енергетичній системі України.

Результати досліджень. У сучасній енергетиці, що характеризується тенденціями децентралізації та зростанням частки відновлюваних джерел енергії, особливої ваги набуває залучення споживачів до активної участі в енергетичних процесах. Ці учасники енергосистеми поєднують функції виробництва та споживання електроенергії, налагоджуючи активну взаємодію з розподільчими мережами та долучаючись до балансування енергомережі. Таким чином вводиться поняття активний споживач. Активний споживач – це учасник енергетичної системи, який одночасно виробляє та споживає електроенергію, активно взаємодіє із системою розподілу та бере участь у балансуванні енергомережі [1,2]. Їхня діяльність спрямована не лише на забезпечення власних енергетичних потреб, а й на підвищення стійкості та гнучкості енергетичної системи в цілому.

Зважаючи на зростаючу роль активних споживачів в енергетичних процесах, постає необхідність розробки нових бізнес-моделей, які б повноцінно відображали особливості їхньої взаємодії з ринком електроенергії та розподільними мережами. Для дослідження таких бізнес-моделей було застосовано моделювання потоків енергії, фінансових розрахунків, послуг з гнучкості та балансування енергосистеми. Цей процес включав побудову однокомпонентних діаграм, що візуалізують ключові функціональні зв'язки кожної розглянутої бізнес-моделі (див.табл. 1) [2,3].

У результаті проведеного моделювання було сформовано різноманітні "архетипи" бізнес-моделей, що узагальнюють типові механізми взаємодії активних споживачів з енергетичною системою. Подальший аналіз цих архетипів дозволяє оцінити їхню ефективність у вирішенні актуальних проблем сучасних енергосистем, таких як забезпечення балансу між попитом та пропозицією, інтеграція нестабільної генерації з відновлюваних джерел та оптимізація використання існуючої мережевої інфраструктури [3].

Одним з характерних прикладів організації активної взаємодії споживачів та енергосистеми є бізнес-модель під назвою «Локальна енергетична компанія», [3]. Суть цієї моделі полягає у формуванні місцевого виробництва електроенергії з відновлюваних джерел для забезпечення потреб споживачів на певній території. Ключовим елементом є застосування механізмів динамічного ціноутворення, що спонукають споживачів гнучко адаптувати своє енергоспоживання до обсягів місцевої генерації [3]. Споживачі, укладаючи договори з місцевим постачальником електроенергії, отримують можливість оплачувати використану

енергію за тарифами, що безпосередньо залежать від рівня локальної генерації. Таким чином, споживач перетворюється на активного гравця енергетичного ринку, оскільки його споживання має прямий вплив на економічну ефективність місцевої енергетичної компанії [2, 3, 7]. Важливо зазначити, що взаємодія з системним оператором зберігається: локальна енергетична компанія несе відповідальність за балансування енергетичних потоків та здійснює оплату за використання розподільчих мереж і послуг системи передачі [2,3] [10]. Це забезпечує підтримку загальної стабільності енергосистеми навіть за умови активного розвитку локальних енергетичних ініціатив.

Модель «Локальна енергетична компанія» націлена на розширення місцевої генерації та створення вигідніших умов купівлі-продажу електроенергії для активних споживачів і просюмерів. У її рамках утворюється локальна енергетична компанія (ЛЕК), яка може функціонувати як об'єднання просюмерів [4]. Для спрощення адміністративних процедур ЛЕК може працювати без ліцензії на постачання електроенергії. Однак для здійснення балансування енергетичних потоків та проведення розрахунків необхідна співпраця з ліцензованим постачальником [2,3,4]. Однією з ключових характеристик моделі є впровадження тарифу, що залежить від часу використання. Цінові сигнали в такому тарифі можуть формуватися на основі динамічних змін вартості електроенергії, що надходять від інтелектуальних лічильників, сигналів оптового ринку або мережевих операторів [4]. Облік споживання електроенергії здійснюється з півгодинною дискретністю, що забезпечує можливість порівняння обсягів споживання та виробництва за ідентичні часові інтервали [2,3].

У випадках, коли обсяг споживання відповідає виробництву з ВДЕ, кошти за спожиту електроенергію залишаються в межах місцевої громади. Якщо ж споживання перевищує місцеву генерацію з ВДЕ, виникає потреба у закупівлі додаткової електроенергії через ліцензованого постачальника, причому ціна закупівлі може варіюватися залежно від часу доби [2,3]. Інформація про ціни та часові рамки тарифів на імпортовану електроенергію може відображатися у спеціалізованому програмному забезпеченні локальної енергетичної компанії. Ймовірно, у цій моделі застосовуватиметься кілька тарифних зон, де ціни у години ранкових та вечірніх пікових навантажень будуть вищими, а в денний та нічний час – нижчими. ЛЕК спільно з ліцензованим постачальником має можливість змінювати та фіксувати ціни на електроенергію протягом року [3].

Для успішної інтеграції бізнес-моделі «Локальна енергетична компанія» в енергетичну систему України необхідно здійснити низку кроків:

1. Адаптувати існуючу нормативно-правову базу для створення локальних енергетичних кооперативів або громадських енергетичних компаній, враховуючи досвід енергетичних громад Європейського Союзу [1].
2. Внести відповідні зміни до правил роздрібного ринку електроенергії, що дозволять застосування динамічного ціноутворення для побутових споживачів залежно від обсягів місцевої генерації [1,11].
3. Використати наявні механізми підтримки виробництва електроенергії з відновлюваних джерел (такі як «зелені» тарифи та аукціони), адаптувавши їх для потреб мікрогенерації та спільного споживання електроенергії в межах об'єднаних територіальних громад (ОТГ) [1].
4. Передбачити розробку спеціальних договорів між локальними енергетичними компаніями та операторами систем розподілу (ОСР) для забезпечення балансування енергетичної системи та справедливої оплати за використання мережевої інфраструктури.

Етапи співпраці учасників у рамках моделі «Локальна енергетична компанія»:

1. Ініціатива щодо створення ЛЕК виходить від громади, ОТГ або приватного підприємства. Формується юридична особа, яка виступає засновником локальної енергетичної компанії [2].
2. Залучаються фінансові ресурси для будівництва електростанцій, що використовують

сонячну, вітрову або біогазову енергію, з орієнтацією на місцеве постачання [2].

3. Відбувається процес узгодження технічних умов підключення об'єктів локальної генерації до мережі оператора системи розподілу (ОСР) [2] [10].

4. Потенційним споживачам пропонуються локальні тарифні плани, які є економічно вигіднішими в години пікового місцевого виробництва електроенергії [2].

4. Застосування динамічного ціноутворення: застосовуються тарифи на електроенергію, що змінюються в залежності від обсягів місцевого виробництва та рівня споживання в режимі реального часу [2].

5. Споживачі отримують інформаційні повідомлення або автоматичні сигнали з рекомендаціями щодо зменшення або збільшення споживання електроенергії у певні часові інтервали, що сприяє балансуванню енергосистеми [2].

6. Оплата за спожиту електроенергію здійснюється за допомогою автоматизованих цифрових платформ з урахуванням обсягів споживання та часу використання [2].

7. Дія договору між споживачем та локальною енергетичною компанією може бути припинена за ініціативою однієї зі сторін після попереднього повідомлення, термін якого становить від 30 до 90 днів і визначається умовами укладеного контракту [2].

Ще одним показовим архетипом бізнес-моделі активних споживачів є «Локальна енергетична компанія з використанням систем накопичення електроенергії» [3]. Ключовою відмінністю цього варіанту є залучення двох постачальників: один відповідає за генерацію електроенергії на місцевому рівні та безпосередню взаємодію зі споживачами, тоді як інший забезпечує резервні поставки з оптового ринку у випадках недостатнього обсягу локальної генерації (див.табл.1). Такий підхід гарантує надійність енергопостачання та забезпечує гнучкість у співпраці з системним оператором, оскільки локальний виробник не несе повного спектру відповідальності за балансування енергосистеми [2,3]. У рамках цієї моделі активний споживач отримує комбінований тариф, розроблений таким чином, щоб стимулювати його до оптимізації власного енергоспоживання відповідно до наявної локальної генерації. Розподільчі мережі відіграють важливу роль, забезпечуючи комутацію між різними джерелами постачання, що є непомітним для кінцевого споживача. Окрім цього, за наявності розвиненого ринку гнучкого попиту, така локальна компанія може укласти договори на надання послуг з балансування безпосередньо із системним оператором, отримуючи за це відповідну винагороду[2,3].

Основні етапи впровадження та функціонування моделі в Україні включають:

1. Створення локальної компанії з обов'язковою інтеграцією систем зберігання енергії [2].

2. Укладання угод про співпрацю з двома постачальниками електроенергії та системним оператором [2].

3. Розробка та встановлення локальних тарифів, що враховують можливості використання систем накопичення енергії [2]. Законодавчо врегулювати можливість застосування динамічного ціноутворення на роздрібному ринку електроенергії для побутових споживачів, внівши відповідні зміни до правил функціонування роздрібного ринку електроенергії [2,11].

4. Участь у ринках допоміжних послуг через залучення систем накопичення енергії для надання послуг з балансування [2].

5. Оптимізація місцевого споживання електроенергії та балансування енергосистеми за допомогою спеціалізованих управляючих платформ [2].

6. Завершення співпраці між споживачем та компанією відбувається згідно з умовами укладеного контракту або шляхом переходу споживача до іншої моделі постачання електроенергії [2].

7. Адаптувати чинну нормативно-правову базу для створення та функціонування локальних енергетичних кооперативів, використовуючи досвід та механізми «енергетичних

громад» Європейського Союзу [2].

У контексті розвитку децентралізованих енергетичних систем та активної участі споживачів у балансуванні енергомережі, особливу увагу привертають нові посередники, здатні консолідувати можливості малих енергетичних об'єктів. Одним із ключових гравців у цьому процесі виступає агрегатор, який у бізнес-моделі «Просюмер-агрегатор» (див.табл.1) об'єднує значну кількість як споживачів, так і невеликих виробників електроенергії в єдиний керований пул з метою досягнення оптимальних показників споживання та генерації [3]. Цей об'єднаний ресурс формує так звану віртуальну електростанцію (ВЕ), що володіє потенціалом активної участі в торгівлі гнучкістю попиту на ринках допоміжних послуг, сприяючи загальній стабільності енергосистеми [2]. Агрегатор постає як новий тип постачальника енергетичних послуг, здатний оперативно регулювати споживання електроенергії групою підключених клієнтів відповідно до поточних потреб мережі. Він отримує право представляти інтереси активних споживачів на енергетичному ринку, включаючи можливість реалізації надлишкової електроенергії, виробленої просюмерами [5]. У рамках своєї діяльності агрегатор створює внутрішній ринок між учасниками об'єднаного пулу, укладаючи двосторонні угоди зі споживачами та координуючи тарифну політику спільно з ліцензованим постачальником електроенергії. Агрегатор бере на себе функції задоволення потреб учасників у здійсненні енергетичних транзакцій, забезпечує їх ринковою інформацією, здійснює управління великою кількістю клієнтів та гарантує необхідну гнучкість споживання для операторів систем передачі та розподілу [2, 3]. Важливим технологічним елементом у функціонуванні агрегатора є використання інтелектуальних систем обліку електроенергії (розумних лічильників), які забезпечують точне вимірювання обсягів спожитої та переданої в мережу енергії, а також автоматизовану передачу даних для здійснення розрахунків та оптимізації тарифних пропозицій [2,3]. Отже, діяльність агрегатора не лише сприяє активнішій залученості споживачів до ринку гнучкості, але й позитивно впливає на стабільність енергетичної системи в цілому, відкриваючи нові можливості для оптимізації енергоспоживання на локальному рівні [3].

У рамках розглянутої моделі агрегатор виконує наступні ключові функції:

1. Здійснює збір невеликих обсягів електроенергії та гнучкості від домогосподарств та малих підприємств [2].
2. Укладає юридично оформлені угоди зі споживачами, спрямовані на автоматизоване управління їхнім енергоспоживанням [2].
3. Об'єднує індивідуальних споживачів у єдину віртуальну електростанцію (ВЕ) [2].
4. Встановлює оперативну взаємодію із системним оператором або оператором системи розподілу з метою надання послуг гнучкості [2] [9].
5. Здійснює розподіл отриманої фінансової винагороди між учасниками об'єднаного пулу, пропорційно до фактично наданих ними послуг гнучкості [2].
6. У ситуаціях, коли системний оператор відчуває потребу у зниженні загального навантаження на енергосистему, агрегатор координує дії своїх учасників для досягнення необхідного зменшення споживання, забезпечуючи їм компенсацію за надану гнучкість. Важливим аспектом діяльності агрегатора є його партнерство з ліцензованими постачальниками електроенергії, що гарантує коректну тарифікацію та прозорість фінансових розрахунків [2].

Функціонування системи відбувається за допомогою потенційних учасників, які укладають договори з агрегатором, визначаючи умови їхньої участі в програмі управління попитом або виробництвом енергії. На об'єктах споживачів встановлюються інтелектуальні лічильники та спеціалізовані системи керування навантаженням для автоматизації відповідних процесів. Окремі малі споживачі та виробники об'єднуються в єдиний віртуальний енергетичний пул під управлінням агрегатора. Агрегатор виступає на ринку від імені об'єднаного пулу, пропонуючи послуги гнучкості оператору системи передачі або

розподілу[9]. Агрегатор здійснює постійний моніторинг та оперативний контроль за споживанням учасників відповідно до запитів системного оператора. Частина отриманого агрегатором доходу від надання послуг гнучкості розподіляється між активними споживачами пропорційно до їхнього внеску. Угода між споживачем та агрегатором може бути припинена після закінчення терміну її дії або за взаємною згодою сторін[6].

Для успішного впровадження моделі «Просюмер-агрегатор» в енергетичну систему України необхідно здійснити ряд важливих кроків:

1. Законодавче визнання агрегаторів. На рівні нормативних документів, зокрема в Кодексі системи передачі та Кодексі системи розподілу, необхідно чітко визначити статус агрегаторів як окремих учасників енергетичного ринку[9].

2. Створення ринку гнучкості. Потрібно розробити та впровадити окремі ринкові механізми, що забезпечать можливість повноцінної участі агрегаторів у балансуючих ринках та ринках допоміжних послуг.

2. Упровадження технічних стандартів. Необхідно забезпечити стандартизацію використовуваних інтелектуальних лічильників та інших пристроїв, що застосовуються для верифікації наданих послуг гнучкості.

3. Можливість участі малих споживачів. На законодавчому рівні слід забезпечити право домогосподарств та представників малого бізнесу надавати послуги гнучкості через посередництво агрегаторів.

4. Створення пілотних проектів. Рекомендується ініціювати та реалізувати демонстраційні проекти для практичної перевірки функціональних можливостей агрегаторів в умовах українського енергетичного ринку та виявлення потенційних проблем і шляхів їх вирішення.

У сфері розвитку інтелектуальних енергетичних систем та активізації участі кінцевих споживачів у регулюванні енергопостачання особливий інтерес представляє модель агрегації «Участь агрегатора без контрагентів», що характеризується можливістю автономної діяльності агрегатора на ринку електричної енергії без обов'язкового залучення традиційних постачальників (див.табл.1) [3]. У рамках даної схеми агрегатор консолідує різнотипних учасників, включаючи побутових споживачів, малих генеруючих установок та трейдерів електричної енергії, формуючи єдиний суб'єкт для здійснення операцій на оптовому ринку або для надання послуг системному оператору [2]. Концепція агрегації забезпечує підвищення економічної цінності гнучкості попиту та пропозиції, надаючи малим енергетичним суб'єктам, які індивідуально не мали б можливості виходу на ринок, доступ до нових джерел отримання доходу [3,5]. Агрегатор надає послуги з управління гнучкістю незалежно від ліцензованих постачальників електроенергії, а учасники об'єднаного пулу добровільно погоджуються змінювати режими власного споживання або генерації в обмін на фінансову компенсацію [3,6].

Разом з тим, впровадження агрегаторських моделей супроводжується певними викликами, зокрема складністю організаційних структур та потенційними обмеженнями існуючого ринкового середовища, що може ускладнювати застосування кооперативних принципів управління [2]. Аналіз показує, що комерційні компанії, як правило, мають вищі шанси на успішний розвиток агрегаторських послуг у співпраці з великими виробниками електроенергії виробленої ВДЕ. Однак, в окремих випадках, доходи, отримані від агрегації, можуть бути достатнім фінансовим підґрунтям для підтримки самостійних моделей співробітництва між агрегатором та окремими кооперативами або домогосподарствами [2]. Незважаючи на те, що агрегація сама по собі не гарантує повної економічної самодостатності бізнес-моделей, орієнтованих на кінцевого споживача, вона відкриває нові канали отримання прибутку для громад та окремих домогосподарств без необхідності володіння значними генеруючими потужностями або залежності від державних субсидій [2,3].

У рамках даної моделі взаємодія між учасниками здійснюється наступним чином:

учасники (споживачі та малі виробники) приєднуються до агрегатора на основі добровільної угоди, погоджуючись на централізоване управління їхнім споживанням або виробництвом електричної енергії. Усі приєднані учасники інтегруються у віртуальну електростанцію (ВЕ) з метою спільної участі в ринкових механізмах. Учасники отримують оперативно передані сигнали для коригування своїх режимів споживання у реальному часі відповідно до ринкових потреб або запитів системного оператора. Доходи, отримані агрегатором від продажу електроенергії системному оператору або іншим учасникам ринку, розподіляються між учасниками ВЕ пропорційно до їхнього внеску у забезпечення цієї гнучкості [3].

Ключовою особливістю моделі є автономна діяльність агрегатора на ринку електричної енергії без обов'язкової участі ліцензованих постачальників. Агрегатор самостійно формує внутрішній ринок серед залучених учасників, визначаючи умови взаємодії та розподілу прибутку [2,3].

Для успішної імплементації моделі «Просюмер-агрегатор» в енергетичному секторі України необхідно здійснити наступні кроки [3]:

1. Забезпечити законодавче закріплення статусу агрегаторів як самостійних учасників ринку електричної енергії у відповідних нормативно-правових актах, зокрема в Кодексі системи передачі та Кодексі системи розподілу.
2. Створити повноцінно функціонуючий ринок гнучкості та забезпечити можливість активної участі агрегаторів у балансуючих ринках та ринках допоміжних послуг.
3. Розробити та затвердити чіткі технічні стандарти для обладнання та програмного забезпечення, що використовуються для точного обліку та верифікації наданих послуг гнучкості.
4. Сприяти залученню малих споживачів та виробників електричної енергії до агрегаторських моделей через спрощення процедур укладання договорів та реалізацію пілотних проектів.
5. Створити тестовий проєкт та провести експеримент, спрямований на практичну апробацію різних моделей агрегації в умовах українського енергетичного ринку для виявлення оптимальних підходів та подолання потенційних бар'єрів.

Однією з перспективних моделей інтеграції відновлюваних джерел енергії на локальному рівні є модель «Колективне автоспоживання», що передбачає об'єднання кількох споживачів навколо спільної установки з генерації ВДЕ [3]. Завдяки своїм характеристикам, даний підхід розширює можливості індивідуального просюмеризму, створюючи сприятливі умови для більш ефективного використання місцевої генерації та зміцнення енергетичної самостійності територіальних громад (див.табл.1) [2]. Дана модель демонструє можливість реалізації двох варіантів колективного автоспоживання, які для зручності аналізу часто розглядаються як єдине концептуальне рішення [1]. Ключову роль у забезпеченні ефективності колективного автоспоживання у моделі відіграє оператор системи розподілу [10]. До його функціональних обов'язків входить забезпечення прозорого обліку виробленої та спожитої енергії, передача відповідних даних постачальникам електричної енергії, а також координація процесів балансування між локальною генерацією та імпортованими обсягами електроенергії [2]. Ліцензовані постачальники, у свою чергу, несуть відповідальність за формування рахунків на оплату на основі даних, наданих ОСР, та забезпечення покриття дефіциту електроенергії з інших доступних джерел [2,3].

Процес організації та функціонування проєктів колективного автоспоживання включає наступні основні етапи:

1. Формування групи споживачів. Ініціювання та юридичне оформлення угоди між зацікавленими споживачами про їхню участь у спільному проєкті з розподілу згенерованої енергії [2].
2. Інвестиції в установку ВДЕ. Фінансування та будівництво установки для генерації електроенергії з відновлюваних джерел (сонячної, вітрової тощо) для задоволення потреб

групи споживачів [2].

3. Інсталяція розумних лічильників. Встановлення індивідуальних пристроїв обліку електроенергії (розумних лічильників) для кожного учасника проекту [2].

4. Укладання договорів із ОСР та інформування постачальників. Оформлення необхідних договірних відносин з оператором системи розподілу та надання інформації ліцензованим постачальникам про застосовувану схему розподілу енергії [2, 10].

5. Реєстрація власника генерації. Проведення процедури реєстрації власника генеруючої установки як виробника «зеленої» енергії у випадку планування продажу надлишкової електроенергії на ринку[2].

6. Поточний моніторинг і облік. Забезпечення безперервного моніторингу та погодинного обліку обсягів виробленої та спожитої електроенергії [2].

7. Фінансові розрахунки. Здійснення взаєморозрахунків між учасниками проекту та ліцензованими постачальниками на основі даних, наданих оператором системи розподілу [2].

8. Завершення участі. Надання споживачам можливості зміни моделі споживання або постачальника електричної енергії за власним бажанням [2].

Для успішної адаптації моделі колективного автоспоживання в енергетичному секторі України необхідно здійснити наступні регуляторні та технічні кроки:

1. Забезпечити законодавче закріплення права на колективне самоспоживання електричної енергії для домогосподарств та суб'єктів малого підприємництва.

2. Впровадити обов'язковий погодинний облік електроенергії для всіх учасників таких проектів шляхом встановлення розумних лічильників [11].

3. Надати споживачам, які беруть участь у проектах колективного автоспоживання, право вільного вибору постачальника електричної енергії.

4. Спростити процедури реєстрації для малих виробників електроенергії з відновлюваних джерел, що беруть участь у схемах колективного самоспоживання.

5. Розробити та впровадити ефективні механізми компенсації за надлишкову згенеровану електроенергію шляхом її інтеграції в існуючий ринок електричної енергії.

6. Запровадити пільгові умови для розрахунків за послуги передачі та розподілу електричної енергії для проектів колективного споживання з метою стимулювання їх розвитку.

У сучасних умовах енергетики постала потреба у розробці дієвих механізмів для збалансування місцевого виробництва та споживання електроенергії. Одним із таких інструментів є запровадження регіональних тарифів на електроенергію, тобто впровадження бізнес-моделі «Локальні тарифи на електроенергію», що успішно застосовуються в ряді європейських країн, включаючи Іспанію та Велику Британію (див.табл.1)[1].

Суть цієї моделі полягає у встановленні диференційованих тарифів для споживачів залежно від їхнього географічного розташування та співвідношення між обсягами місцевої генерації та споживання електроенергії. У регіонах, де локальне виробництво перевищує попит або є йому еквівалентним, передбачається застосування нижчих тарифів. І навпаки, в енергодефіцитних регіонах ціни на електроенергію встановлюються на вищому рівні, що стимулює розвиток місцевої генерації та оптимізацію споживання енергоресурсів [1,2]. Впровадження локальних тарифів створює економічні стимули для споживачів щодо коригування власного профілю енергоспоживання з орієнтацією на доступну локальну генерацію. Крім того, ця модель заохочує інвестиції в місцеві енергетичні проекти та використання відновлюваних джерел енергії [1]. Локальні енергетичні компанії, функціонуючи в таких умовах, отримують можливість активної участі на ринках попиту, що відображено в схемах моделювання через механізми "балансування" та "мобільні сервіси" [2]. Завдяки цьому, колективна взаємодія активних споживачів забезпечує більш ефективну стратегію закупівлі електроенергії порівняно з використанням виключно тарифних стимулів

[3]. Таким чином, регіональні тарифи не лише впливають на поведінку кінцевих споживачів, спонукаючи їх до більш усвідомленого енергоспоживання, але й активізують місцеві енергетичні ринки, сприяючи розвитку нових бізнес-моделей та різних форм співпраці між споживачами, виробниками та постачальниками електроенергії [2].

У рамках моделі "Локальні тарифи на електроенергію" ключовими учасниками є оператори системи розподілу (ОСР), локальні енергетичні компанії або кооперативи, ліцензовані постачальники електроенергії та активні споживачі. ОСР здійснюють аналіз співвідношення місцевого виробництва та споживання електроенергії, надаючи відповідні дані для формування диференційованих тарифів. Локальні енергетичні компанії або кооперативи керують обсягами місцевої генерації та налагоджують взаємодію зі споживачами. Ліцензовані постачальники здійснюють виставлення рахунків за спожиту електроенергію відповідно до встановлених регіональних тарифів. Активні споживачі, реагуючи на цінові сигнали, коригують власне енергоспоживання з метою оптимізації витрат та стимулювання розвитку місцевої генерації. Слід також зазначити, що ОСР спільно з локальними компаніями можуть надавати мобільні послуги з балансування енергосистеми, сприяючи її загальній стійкості [2,3].

Для успішної адаптації моделі регіональних тарифів в енергетичній системі України необхідно здійснити наступні кроки:

1. Створити належну законодавчу основу, що регулюватиме процес регіонального тарифоутворення на роздрібному ринку електричної енергії.
2. Визначити операторів системи розподілу (ОСР) відповідальними за здійснення обліку місцевого балансу між виробництвом та споживанням електричної енергії.
3. Розробити та впровадити систему стимулів для розвитку місцевих ініціатив у сфері відновлюваної енергетики, орієнтованих на потреби колективного споживання.
4. Забезпечити впровадження погодинного обліку споживаної електричної енергії для всіх категорій споживачів, які є учасниками системи регіональних тарифів.
5. Надати підтримку створенню та розвитку локальних енергетичних компаній або кооперативів шляхом реалізації відповідних державних або муніципальних програм.

У рамках цього дослідження було здійснено впорядкування основних бізнес-моделей активного споживання, що використовуються в сучасних енергетичних системах. Зокрема, порівняльна характеристика шести типових моделей за такими критеріями, як мета впровадження та технічні особливості, представлена у таблиці 1. Зазначений підхід дозволяє наочно продемонструвати функціональне наповнення кожної моделі, а також виявити технічні потреби, які необхідно врахувати при їхній адаптації до українських умов. Це є особливо значущим у контексті відновлення енергетичної інфраструктури після воєнних дій, оскільки ефективність технічних рішень прямо впливає на енергетичну безпеку суспільства.

Таблиця 1 – Особливості бізнес-моделей [3]

Схема бізнес-моделей	Назва бізнес-моделей	Ціль впровадження	Технічні особливості
ПОЯСНЕННЯ Електрика Платежі Додатковий/технічний сервіс	Бізнес-модель «Локальна енергетична компанія»	Оптимізація локального споживання та генерації	Інтелектуальні лічильники, динамічне ціноутворення, зв'язок із ОС
ПОЯСНЕННЯ Електрика Платежі Сервіс Балансування	Бізнес-модель «Локальна енергетична компанія з використанням системи накопичення електроенергії»	Балансування через системи зберігання	Наявність акумулюючих систем, змішане джерело постачання, інтеграція з системним оператором
ПОЯСНЕННЯ Електрика Платежі Додатковий/технічний сервіс	Бізнес-модель «Просюмер – агрегатор»	Управління груповим попитом	Віртуальні електростанції, централізоване керування, гнучкість споживання
ПОЯСНЕННЯ ЛП Ліцензований постачальник Електрика Платежі Балансування Сервіс	Бізнес-модель «Участь агрегатора без контрагентів»	Автономне ринкове представництво	Автономні алгоритми керування, відсутність контрагентів, локальна координація

ПОВ'ЯЗАННЯ OSP — Оператор системи розподілу OSP — Оператор системи передачі Електрика —————> Платіжі - - - - -> Дані аналітики>	Бізнес-модель «Колективне автоспоживання»	Спільне використання генерації ВДЕ	Погодинний облік, індивідуальні лічильники, централізований облік OSP
ПОВ'ЯЗАННЯ Електрика —————> Платіжі - - - - ->	Бізнес-модель «Локальні тарифи на електроенергію»	Стимулювання локального балансу	Залежність тарифів від місцевого балансу, аналітика OSP, цінові сигнали

Аналіз впливу різних моделей на споживчу поведінку, дослідження застосовуваних механізмів стимулювання попиту та визначення ролі оператора системи розподілу або системного оператора в кожній розглянутій схемі є важливим для оцінки можливостей їхньої інтеграції в національний енергетичний контекст. З цією метою було проведено порівняльне дослідження шести ключових моделей.

Таблиця 2 – Порівняльна таблиця моделей керування попитом активних споживачів через бізнес-моделі

Назва моделі	Участь споживача у балансуванні	Механізм керування попитом	Роль ОСР/СО	Рівень гнучкості попиту	Фінансова мотивація
Локальна енергетична компанія	Регулювання попиту у відповідності з місцевою генерацією ВДЕ	Динамічні тарифи	Балансування мережі, розподіл енергії	Середній	Так
Локальна енергетична компанія з використанням системи накопичення електроенергії	Комутація між локальною генерацією та постачанням із загальної електромережі	Комбіновані тарифи (локальні+ купівля із зовнішньої мережі)	Балансування і резервне постачання	Середній	Так

Просюмер-агрегатор	Автоматизоване регулювання через агрегатора	Участь у програмах гнучкості через агрегатора	Передача команд агрегатора	Високий	Так
Участь агрегатора без контрагентів	Автоматизоване регулювання через агрегатора без контрагентів	Участь у програмах гнучкості без ліцензійного контрагента	Передача команд агрегатора	Високий	Так
Колективне автоспоживання	Оптимізація споживання власної виробленої енергії	Спільне використання генерації + тарифні розрахунки	Облік виробництва і споживання	Низький	Так
Локальні тарифи на електроенергію	Регулювання попиту з огляду на локальні ціни на електроенергію	Фінансові стимули через локальні тарифи	Моніторинг місцевого балансу	Середній	Так

Дослідження шести різних підходів до активного залучення споживачів в управління попитом виявило різноманіття стратегій інтеграції споживачів в енергетичні ринки, що різняться за механізмами взаємодії, ступенем технологічної інтеграції та фінансовими мотиваторами.

Найбільшу гнучкість попиту демонструють моделі, що використовують агрегаторів ("Просюмер-агрегатор" та «Участь агрегатора без контрагентів»), завдяки здатності централізовано координувати великі групи малих споживачів і виробників енергії.

Моделі «Локальна енергетична компанія» та «Локальна енергетична компанія з використанням системи накопичення електроенергії» впроваджують механізми гнучкості через застосування динамічних або комбінованих тарифних планів, що спонукають до зміни споживчих звичок у залежності від обсягів місцевої генерації.

Модель «Колективне автоспоживання» має обмежений вплив на загальний баланс енергосистеми, оскільки її основна мета полягає в оптимізації власного енергоспоживання учасників, а не в їхній активній участі у зовнішніх ринках допоміжних послуг.

«Локальний тариф» забезпечує додаткову мотивацію для споживачів щодо адаптації власного споживання до місцевих енергетичних умов, хоча їхній вплив на фактичне балансування системи є непрямим.

Кожна з досліджених моделей активного залучення споживачів до управління попитом демонструє унікальний набір характеристик, що визначають специфічні вимоги до адаптації нормативно-правової бази, розвитку технологічної інфраструктури та формування нових форм кооперації між кінцевими споживачами, виробниками енергії та операторами енергетичних систем; з метою систематизації цих ключових аспектів було проведено оцінку ступеня необхідності внесення законодавчих змін для кожної моделі, що дозволяє краще зрозуміти потенційні бар'єри та необхідні регуляторні ініціативи для їхньої успішної інтеграції

в енергетичну систему.

Таблиця 3 – Оцінка складності впровадження моделей активного споживача в Україні

Назва моделі	Потреба у законодавчих змінах	Перелік необхідні зміни	Інтеграція в існуючі ринки
Локальна енергетична компанія	Значна	Введення до правового поля поняття "локальна енергетична компанія", надання дозволу на застосування динамічного ціноутворення для домогосподарств, розробка нормативних актів щодо локального балансування енергосистеми.	Середня
Локальна енергетична компанія з використанням системи накопичення електроенергії	Значна	Законодавче врегулювання можливості спільного постачання енергії кількома постачальниками, адаптація правил торгівлі електричною енергією для функціонування локальних мікроенергетичних мереж.	Складна
Просюмер-агрегатор	Помірна	Офіційне визнання статусу агрегаторів у Кодексі системи передачі та Кодексі системи розподілу, надання права малим споживачам брати участь у ринку через агрегаторів.	Середня
Участь агрегатора без контрагентів	Помірна	Законодавче закріплення права агрегаторів на самостійну участь у ринку електричної енергії без обов'язкової прив'язки до ліцензованого постачальника.	Середня
Колективне автоспоживання	Помірна	Легалізація різних моделей колективного споживання електричної енергії, надання дозволу на пряме спільне використання генеруючих об'єктів, що працюють на відновлюваних джерелах енергії.	Легка
Локальні тарифи на електроенергію	Значна	Розробка та впровадження законодавчого механізму регіонального тарифоутворення на роздрібному ринку електричної енергії, покладання на операторів системи розподілу обов'язку ведення погодинного обліку локального балансу виробництва та споживання.	Складна

Аналіз впровадження інноваційних бізнес-моделей активного споживання в Україні виявив необхідність комплексних трансформацій як у законодавчому полі, так і в інституційній структурі енергетичного сектору; зокрема, запровадження моделей локальних енергетичних компаній та регіональних тарифів є найбільш складним завданням, що вимагає фундаментальних змін у підходах до ціноутворення, балансування енергетичних потоків та юридичного оформлення місцевих енергетичних ініціатив, тоді як моделі агрегаторів, маючи менший ступінь складності впровадження, потребують чіткого визначення правового статусу агрегаторів та розробки механізмів їхньої участі в ринках гнучкості; модель колективного автоспоживання видається найбільш сприятливою для швидкої адаптації, оскільки її впровадження пов'язане з відносно незначними змінами в законодавстві, переважно у сфері регулювання спільного використання об'єктів відновлюваної енергетики; водночас, практично для всіх розглянутих моделей ключовою передумовою є подальший розвиток інфраструктури інтелектуальних систем обліку, запровадження погодинного обліку енергоспоживання та інтеграція цифрових платформ для здійснення ефективного моніторингу; успішне впровадження моделей активного споживання вимагатиме скоординованих зусиль законодавчої, регуляторної та виконавчої гілок влади, спрямованих на формування гнучкої нормативної бази та стимулювання інвестицій у розвиток місцевої енергетики; отже, розробка детальних дорожніх карт для імплементації кожної конкретної моделі повинна ґрунтуватися на всебічній оцінці існуючих правових перешкод, технічних потреб та загальної готовності ринку до впровадження нових механізмів споживання та виробництва енергії [8].

Висновки

1. Аналіз представлених бізнес-моделей активного споживання продемонстрував їхні відмінні механізми впливу на поведінку споживачів, різні підходи до стимулювання попиту та неоднакову роль операторів розподільних мереж (ОРМ) або системних операторів (СО). В умовах руйнування енергетичної інфраструктури України та нагальної необхідності її відновлення після завершення воєнних дій, оцінка можливостей застосування цих моделей набуває особливої значущості [8]. Зокрема, модель «Локальна енергетична компанія», використовуючи динамічне ціноутворення, забезпечує помірну гнучкість споживання та вимагає законодавчого оформлення для місцевих енергетичних ініціатив [1][2].

2. Модель «Локальна енергетична компанія з використанням систем накопичення електроенергії» характеризується високою надійністю та адаптивністю завдяки можливості переходу між місцевою генерацією та оптовими закупівлями [1]. В умовах воєнного часу вона може стати ключовим елементом підтримки стабільного енергопостачання у критично важливих регіонах, проте її реалізація ускладнюється необхідністю узгодження дій кількох постачальників [2][3].

3. Модель «Просюмер-агрегатор» надає можливість централізованого управління попитом значних груп споживачів за сигналами СО [1]. Вона має значний потенціал для забезпечення гнучкості енергосистеми в період нестабільних поставок енергії та відновлення мережі за умови створення відповідної правової бази для діяльності агрегаторів [2][3].

4. Модель «Участь агрегатора без контрагентів» передбачає незалежне функціонування агрегаторів, які самостійно координують попит та генерацію [1]. Це забезпечує високу адаптивність енергосистеми навіть за обмеженості ресурсів, що є особливо важливим у воєнний період, однак потребує реформування існуючих ринкових правил та визначення юридичного статусу агрегаторів [2][3].

5. Модель «Колективне автоспоживання» сприяє розвитку спільних енергетичних проєктів на рівні домогосподарств і громад, не вимагаючи складних механізмів балансування попиту [1]. Її простота та відносно невисокі вимоги до законодавчих змін роблять її одним з найперспективніших варіантів для швидкої реалізації у відновлюваних громадах після завершення бойових дій [2].

6. Модель «Локальні тарифи на електроенергію» використовує диференційовані тарифні плани для стимулювання розвитку місцевої генерації [1]. Вона дозволяє адаптувати попит до регіональних особливостей, що є особливо актуальним в умовах нерівномірного відновлення енергетичних об'єктів. Проте її впровадження потребує глибокої трансформації системи тарифоутворення та розробки нових ринкових правил [2][3].

7. Підсумовуючи, модель «Колективне автоспоживання» є найбільш прийнятною для оперативного та ефективного впровадження в енергетичній системі України в умовах війни та післявоєнної відбудови [1][2]. Її легкість інтеграції, залежність від існуючих розподільних мереж та помірна потреба в законодавчих змінах роблять її оптимальним інструментом для підтримки локальних громад. Ефективне управління попитом у цій моделі може бути досягнуто через застосування погодинного обліку, стимулювання споживачів до узгодження споживання з місцевим виробництвом та інтеграцію механізмів гнучкості через співпрацю з органами місцевого самоврядування, що сприятиме зміцненню енергетичної самостійності регіонів України.

Список використаної літератури

1. Hall, S., Brown, D., Davis, M., Ehrmann, M., Holstenkamp, L., (2020) Business Models for Prosumers in Europe. PROSEU - Prosumers for the Energy Union: Mainstreaming active participation of citizens in the energy transition (Deliverable N°D4.1), p. 89.
2. Petrick, K., Fosse, J., Klarwein, S. (2019). *Principles for Prosumer Policy Options*. PROSEU Project, Deliverable D3.3, pp. 24–45.
3. Гілевич К.М. Співставний аналіз реалізації бізнес-моделей просюмерів з відновлюваними джерелами енергії // Енергетика: економіка, технології, екологія. — 2023. — №1. — С. 64–81. DOI: 10.20535/1813-5420.1.2023.275998.
4. Hardy P., Pinto-Bello A. EU Market Monitor 2019 for Demand Side Flexibility. Smart Energy Europe and Delta EE, 2019. URL: https://www.smart.eu/wp-content/uploads/2019/11/EU_Market_Monitor_2019_short_final.pdf (дата звернення: 28.04.2025).
5. Terlouw, T., AlSkaif, T., Bauer, C. and van Sark, W., 2019. Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies. *Applied Energy*, 239, pp.356-372. URL: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.115816>.
6. Agregador de demanda: qué es y qué hace: web-site. URL: <https://www.enertra.es/agregador-de-demanda/> (дата звернення: 28.04.2025).
7. Денисюк С.П., Коломійчук М.О. Оцінка фінансових та технічних показників ефективності роботи microgrid в динамічних режимах // Енергетика: економіка, технології, екологія. —2021. — № 3. —С. 18–38.
8. Закон України "Про ринок електричної енергії" № 2019-VIII від 13.04.2017. — [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19>
9. Кодекс системи передачі електричної енергії: постанова НКРЕКП № 309 від 14.03.2018. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18>
10. Кодекс системи розподілу електричної енергії: постанова НКРЕКП № 310 від 14.03.2018. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0310874-18>
11. Порядок функціонування роздрібного ринку електричної енергії: постанова НКРЕКП № 312 від 14.03.2018. — [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18>

K.M. Hilevich

ORCID 0000-0001-9074-0683

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

In the context of the ongoing war in Ukraine and its devastating impact on the country's energy infrastructure, the issue of integrating active consumers into the energy market has become critically important. Given the growing significance of renewable energy sources for enhancing energy resilience and decentralizing energy systems as a strategic response to wartime threats, the task of involving active consumers in the functioning of the energy market is increasingly relevant. This study focuses on the analysis of business models that facilitate consumer participation in balancing electricity consumption and generation processes, which is crucial for ensuring reliable energy supply during wartime and the post-war recovery period.

The article presents an analysis of six typical business models for active consumers, namely: "Local Energy Company," "Local Energy Company with Energy Storage Systems," "Prosumer Aggregator," "Aggregator without Counterparties," "Collective Self-Consumption," and "Regional Electricity Tariffs." Their organizational structures, stages of interaction with consumers, financial settlement principles, and conditions for terminating cooperation are explored. Special attention is given to the mechanisms of demand-side management, the level of energy consumption flexibility, the role of distribution system operators (DSOs), and the use of digital technologies for energy monitoring and management.

The results of the study reveal that the main features of most of the analyzed models include involving consumers in the system balancing process, promoting the development of local energy generation, and encouraging active participation through flexible tariff mechanisms. Recommendations are formulated regarding the potential implementation of active consumption models in Ukraine's energy system, emphasizing the need for official recognition of energy service aggregators, the establishment of a legal framework for dynamic pricing, support for the development of local energy companies, and the introduction of legislative regulations for shared energy use through distribution networks.

Active consumers are considered a key factor in the transition to a decentralized, environmentally sustainable, and energy-independent system, promoting the integration of renewable energy sources at the local level and optimizing energy network balancing. The findings of the study serve as an important information base for further development of legislative and regulatory initiatives aimed at enhancing citizen participation in the development of energy markets and supporting Ukraine's energy transformation process.

Keywords: active consumer, prosumer, aggregator, demand-side management, distribution network, local energy company, tariffs, RES, energy decentralization, self-consumption, microgrid, energy storage system, generation, balancing.

УДК 621.31

Лепешко А.А., аспірант, ORCID 0000-0002-6018-3596
Київський національний університет будівництва і архітектури

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ

Анотація. Питання використання постійного чи змінного струму досліджується тривалий час, і хоч вважається, що долю постійного струму було вирішено в 2007 році, на сьогодні залишається сумнів, щодо поспішного рішення його перспективи у багатьох вчених. В даній роботі наводяться результати дослідженого питання, щодо перспективності розвитку електропостачання постійного струму в населених пунктах, як засіб централізованої енергосистеми для використання його житловим сектором. Дослідження проводилося для житлового сектору у який входять індивідуальні, багатоквартирні житлові будинки, заклади тимчасового проживання, такі як готелі та гуртожитки, на прикладі м. Києва. Отримані результати дозволяють по новому переглянути енергосистему в населених пунктах. Основний чинник, який впливає на споживання постійного струму, являється використання новітніх технологій в енергетиці та техніці. Розуміючи позитивні та негативні сторони обох видів струму та використавши їх у поєднанні з новітніми технологіями, ми зможемо побачити нову перспективу використання постійного струму як вагомому складову енергосистем в населених пунктах.

Ключові слова: постійний струм, змінний струм, енергоефективність, електропостачання, енергоменеджмент, населений пункт, місто, споживач

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DIRECT CURRENT ELECTRICITY SUPPLY IN POPULATED AREAS

Abstract. The question of the use of direct current or alternating current has been studied for a long time, and although it is believed that the fate of direct current was decided in 2007, today there is a doubt about the hasty decision of its perspective among many scientists. This work presents the results of the researched question regarding the prospects for the development of direct current power supply in populated areas as a means of a centralized power system for its use by the residential sector. The study was conducted for the housing sector, which includes individual, multi-apartment residential buildings, temporary accommodation facilities, such as hotels and hostels, using the example of the city of Kyiv. The obtained results allow a new look at the energy system in populated areas. The main factor that affects the consumption of direct current is the use of the latest technologies in energy and engineering. By understanding the positive and negative sides of both types of current and using them in combination with the latest technologies, we will be able to see a new perspective of using direct current as an important component of energy systems in populated areas.

Key words: direct current, energy efficiency, power supply, energy management, settlement, city, consumer.

Вступ. На сьогоднішній день розвиток сучасних технологій збільшує ряд обладнання як для міського так і для побутового споживання, зокрема це електротранспорт, системи SmartGrid, комп'ютеризована та мобільна техніка, робототехніка, акумуляування електроенергії, використання ВДЕ та інше. Все це вимагає в своїй основі постійного струму. Саме через такий попит на такий вид постачання електроенергії створює інтерес та актуальність даної тематики.

Слід також зазначити, що через деякий ряд недоліків такої системи змінний струм все ж таки залишається конкурентним. Саме через транспортування постійного струму на короткі відстані як правило уступають у економічній вигоді перед змінним струмом. Тому дослідження та порівняння всіх переваг та недоліків обох систем у сучасному середовищі можуть допомогти у визначенні подальшого розвитку електросистем населених пунктів.

Відповідно дана робота зосереджена на проведенні аналізу енергоефективності між системами постійного та змінного струму з визначенням реалізації використання постійного струму в комплексі житлового сектору населеного пункту.

Зв'язок роботи з науковими завданнями, програмами, планами, темами та іншою науковою діяльністю то ва Виконані у роботі дослідження відповідають напрямку «Енергетика та енергоефективність» Закону України № 2519-VI від 09.09.2010 р. «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» [1].

Сучасні тенденції розвитку енергетичних систем зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до електропостачання населених пунктів. Традиційна система на базі змінного струму, що домінує з часів електрифікації, поступово стикається з технічними та економічними обмеженнями, особливо в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії, збільшення кількості електронних приладів та потреби у підвищенні енергоефективності. Питання порівняльної характеристики конфігурацій архітектури енергосистеми на змінному та постійному струмі для населених пунктів більше детально розглянуто в публікації [2].

Питаннями постійного струму займається досить велика кількість дослідників, чий роботи відіграють важливу роль при пошуку кращих рішень використання постійного струму. Серед багатьох робіт, варто відзначити роботи: Вегера В.В. – «Аналіз передачі потужності на великі відстані постійним та змінним струмом» [3], Штавови Г. – «Постійний струм: революція не за горами» [4], Мельничук Г.В. – «Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних SMART-комплексів» [5], Crews R., Nielson K. – “Interleaving is Good for Boost Converters, Too” [6]. Billings K. “Advantages of Interleaving Converters” [7], Gallagher J. – “Coupled Inductors Improve Multiphase Buck Efficiency” [8].

З огляду на сукупність технічних, економічних та екологічних чинників, наукове обґрунтування перспектив розвитку електропостачання постійного струму в населених пунктах набуває актуальності через необхідність формування теоретичних засад і практичних рішень для майбутньої модернізації локальних енергосистем з урахуванням світових трендів та інженерно-економічних переваг технологій постійного струму.

Мета та завдання. Метою дослідження є визначення тенденцій розвитку енергоефективності населених пунктів та оптимальних підходів до їх аналізу та розрахунків в умовах впровадження технологічних інновацій у сфері електричних технологій, а також децентралізації населених пунктів.

Матеріал і результати дослідження. Для розрахунку енергоефективності двох різних систем розробляється математична модель в якій кінцевими показниками виступають енергетичні та фінансові витрати. Для проведення розрахунків електроспоживання та електроефективності між постійним та змінним струмом необхідно встановити основні параметри населеного пункту (табл.1).

Так як розрахунки енергоспоживання проводяться на житловий сектор то основними категорії користувачів являються: індивідуальні будинки, багатоквартирні будинки, будинки тимчасового проживання (готелі, хостели) та гуртожитки.

Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) [9, с. 13-14], кожний споживач має свою категорію електроприймачів і збереження надійності електропостачання, яка повинен мати відповідне забезпечення електроенергії. В розрахунки було включено відсоток акумуляування та використання ВДЕ у споживачів.

Таблиця 1. Основні параметри які впливають на електросистему міста, зокрема житлового сектору

Основні параметри для введення	Позначення	Показники	Одиниці виміру
Кількість мешканців населеного пункту	$n_{\text{мешк.м.}}$	2 950 702	осіб
Вартість електроенергії для побут. корист.	$C_{\text{ел.ен.п.к.}}$	1,44	грн./кВт
Вартість електроенергії для громадських споживачів	$C_{\text{ел.ен.г.с.}}$	1,68	грн./кВт

Всі подальші розрахунки енергозабезпечення ґрунтуються на кількості споживачів (табл. 2).

Таблиця 2. Види та кількість споживачів

Види споживачів	Позначення	Показники
Кількість індивідуальних будинків	$n_{\text{інд.б}}$	16 229
Кількість квартир	$n_{\text{кв.б}}$	1 203 886
Кількість номерів у закладах тимчасового проживання	$n_{\text{ном.тп.}}$	162 879
Кількість кімнат у гуртожитках	$n_{\text{кім.гурт.}}$	129 831

Енергоефективність при використанні різних типів струму на міському рівні (м.р.) визначається порівнянням – якщо $W_{AC(m.p.)} < W_{DC(m.p.)}$ то використання постійного струму вважатиметься енергоефективніше і виражається у формулі 1:

$$W_{\text{еф.}(m.p.)} = \sum W_{AC(m.p.)} - \sum W_{DC(m.p.)}, \text{кВт} / \text{рік} \quad (1)$$

де $\sum W_{AC(m.p.)}$ – Сумарне енергоспоживання на весь житловий сектор міста при змінному струмі за рік з усередненим використанням між споживачами, кВт/рік;

$\sum W_{DC(m.p.)}$ – Сумарне енергоспоживання на кожну окрему категорію при постійному струмі за один сезон з усередненим використанням між споживачами, кВт/рік.

Аналізуючи ситуацію для різних періодів, зокрема для 1996, 2022 та 2050 років, з допомогою математичної моделі аналогічних розрахунків можна було зауважити значні позитивні дані на період 2050 рр., а саме енергоефективність системи постійного струму для житлового сектору м. Києва, буде залишатися більшою на 183,6 ГВт ніж при змінному струмі. Відповідно вартість такої системи коштуватиме на все місто дешевше на 583,3 млрд. грн. (з врахуванням планованого еквіваленту інфляції на 2050р.)

Отже для наочності всі показники представлено на графіку з порівнянням енергоефективності постійного струму (рис. 1). Різниця у вартості кожної з систем залежить від багатьох факторів, зокрема: економіки в державі, відносин на зовнішніх та внутрішніх ринках, технології та видів обладнання. Проте, опираючись на існуючі історичні та сьогоденні дані можна побачити різницю вартостей обох систем (рис.1).

В даних розрахунках було побудовано математичну модель саме для житлового сектору міста. Провівши ряд розрахунків можна висунути твердження, щодо інших секторів міста, зокрема для громадського, комунального та виробничого. Можна припустити, що для громадського використання системи постійного струму може не відіграти особливо важливої ролі, крім випадку якщо не підвищиться рівень потреб побутового обладнання на постійному

струмі. Так як на разі значна кількість приладів громадського сектору може використовуватися і на змінному струмі.

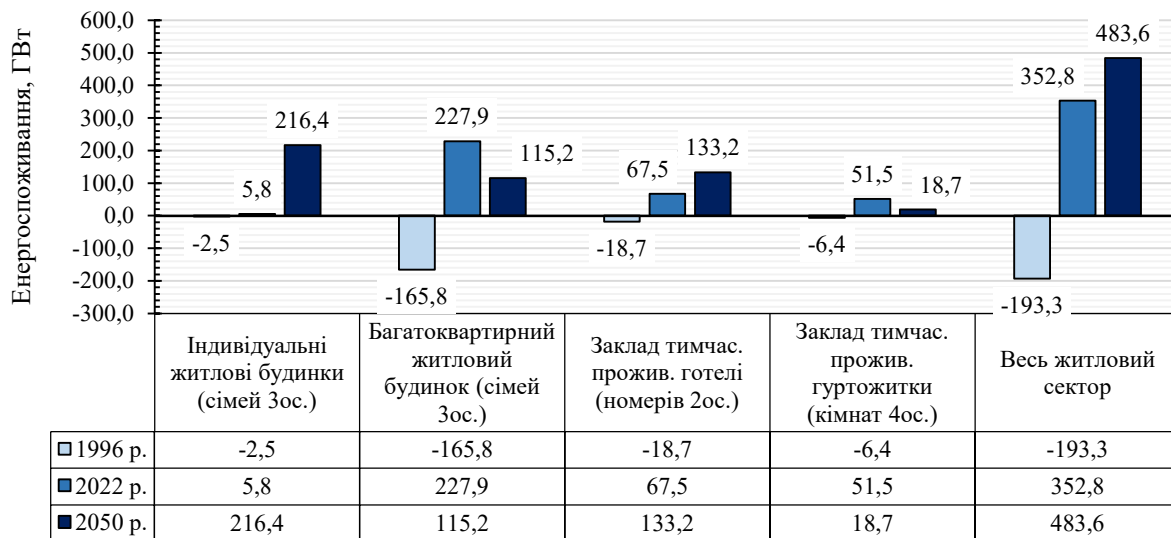


Рисунок 1. Діаграма енергоефективності системи постійного струму

Для комунального сектору можна зазначити, що значна частина міського обладнання, зокрема лінійного електротранспорту і так використовується на постійному струмі, а вуличне освітлення та насосні станції залишаються працювати на змінному струмі. Для виробничого сектору може бути ефективнішим саме змінна напруга, через використання великої кількості асинхронних двигунів. Проте якщо впровадити в індустрію використання більше двигунів на постійному струмі, що мають перевагу в кількості обертів, а також збільшити використання систем штучного інтелекту для автоматизації виробничих процесів, то можна також буде розглядати енергоефективність постійного струму і для виробничого сектору.

Висновок: Підводячи підсумки всіх розрахунків з допомогою створення математичної моделі, для якої слугували вихідні дані з доступних джерел можна зазначити, що в дійсності у попередні роки було енергоефективніше використовувати систему на змінному струмі, хоч вона й була дещо дорожчою, проте витрати легко окупувалися через її енергоефективність. На сьогоднішній день, згідно проведених розрахунків дана система втрачає свою ефективність через збільшення можливостей та потреб для використання ВДЕ з акумуляцією електроенергії, як локальному, так і на міському рівні для споживачів 1ї та 2ї категорій надійності.

Список використаних джерел

1. Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» № 2519-VI від 09.09.2010 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14#Text> (Дата звернення: 05.03.2025).
2. Денисюк С.П., Лепешко А.А. Порівняльна характеристика конфігурацій архітектури енергосистеми на змінному та постійному струмі для населених пунктів. The XVII International Scientific and Practical Conference. «Science, theory and ways to improve methods». London, Great Britain. eu-conf. 2023. 368-374 с. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.23938.25284> (Дата звернення: 05.03.2025).
3. Вегера В.В. Аналіз передачі потужності на великі відстані постійним та змінним струмом. International scientific e-journal. Режим доступу: <https://www.ukrlogos.in.ua/>

10.11232-2663-4139.16.33.html. (дата звернення: 22.04.2025).

4. Штавови Г. Постійний струм: революція не за горами / LAPP Ukraine. Режим доступу: <https://lappukraine.lappgroup.com/novini/tematichni-statti/zlam-paradigmi-vid-zmi-nnogo-strumu-do-postiinogo/postiinii-strum-revoljucija-ne-za-gorami.html> (date: 22.04.2025).

5. Мельничук Г.В. Дисертаційна робота. Розвиток методів аналізу стаціонарних режимів роботи електротехнічних SMART-комплексів. Київ – 2021 – 214с.

6. Crews R., Nielson K. Interleaving is Good for Boost Converters, Too. 2008. Retrieved from: <http://powerelectronics.com/power-management/interleaving-good-boost-converters-too>. (date: 22.04.2025).

7. Keith Billings. Advantages of Interleaving Converters. 2003. Retrieved from: <https://www.electronicdesign.com/content/advantages-interleaving-converters> (date: 22.04.2025).

8. Gallagher J. Coupled Inductors Improve Multiphase Buck Efficiency. 2006. Retrieved from: <https://www.electronicdesign.com/passive-components/coupled-inductors-improve-multiphase-buck-efficiency> (date: 22.04.2025).

9. Правила улаштування електроустановок. Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. Затверджені Наказом Міненерговугілля України від 21.07.2017 № 476. – 2017. С.617. Режим доступу: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/rue.pdf> (Дата звернення: 05.03.2025).

References

1. Zakonu Ukrainy «Pro priorytetni napriamy rozvytku nauky i tekhniky» № 2519-VI vid 09.09.2010 r. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14#Text> (Data zvernennia: 05.03.2025). {Ukr}.

2. Denysiuk S.P., Lepeshko A.A. Porivnialna kharakterystyka konfiguracyi arkhitektury enerhosystemy na zminnomu ta postinomu strumi dlia naselenykh punktiv. The XVII International Scientific and Practical Conference. «Science, theory and ways to improve methods». London, Great Britain. eu-conf. 2023. 368-374 c. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.23938.25284> (Data zvernennia: 05.03.2025). {Ukr}.

3. Vehera V.V. Analiz peredachi potuzhnosti na velyki vidstani postiinym ta zminnym strumom. International scientific e-journal. Rezhym dostupu: <https://www.ukrlogos.in.ua/10.11232-2663-4139.16.33.html>. (data zvernennia: 22.04.2025). {Ukr}.

4. Shtavovy H. Postiinyi strum: revoliutsiia ne za horamy / LAPP Ukraine. Rezhym dostupu: <https://lappukraine.lappgroup.com/novini/tematichni-statti/zlam-paradigmi-vid-zmi-nnogo-strumu-do-postiinogo/postiinii-strum-revoljucija-ne-za-gorami.html> (date: 22.04.2025).

{Ukr}.

5. Melnychuk H.V. Dysertatsiina robota. Rozvytok metodiv analizu statsionarnykh rezhymiv roboty elektrotekhnichnykh SMART-kompleksiv. Kyiv – 2021 – 214s.

6. Crews R., Nielson K. Interleaving is Good for Boost Converters, Too. 2008. Retrieved from: <http://powerelectronics.com/power-management/interleaving-good-boost-converters-too>. (date: 22.04.2025). {Eng}.

7. Keith Billings. Advantages of Interleaving Converters. 2003. Retrieved from: <https://www.electronicdesign.com/content/advantages-interleaving-converters> (date: 22.04.2025). {Eng}.

8. Gallagher J. Coupled Inductors Improve Multiphase Buck Efficiency. 2006. Retrieved from: <https://www.electronicdesign.com/passive-components/coupled-inductors-improve-multiphase-buck-efficiency> (date: 22.04.2025). {Eng}.

9. Pravyla ulashtuvannia elektroustanovok. Ministerstvo enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti Ukrainy. Zatverdzeni Nakazom Minenerhovuhillia Ukrainy vid 21.07.2017 № 476. – 2017. S.617. Rezhym dostupu: <https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/normdocs/pue.pdf> (Data zvernennia: 05.03.2025). {Eng}.

УДК 536.2

Шматок Руслан Дмитрович
НН ІЕЕ

ESOFRIENDLY МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДІВНИЦТВА

Наразі в людства є суттєві проблеми (виклики) вирішення яких дає відповідь на питання нашого існування і дві з них сьогодні буде розглянуто в рамках цієї статті: перша це проблема значного використання енергії та ресурсів на потреби людини в контексті захисту від стихій природи, а друга – утилізація відходів. На сферу будівництва приходить значна частка: викидів вуглекислого газу CO_2 близько 39%, 36% споживання енергії та 50% видобутку природних ресурсів за даними дослідження Міжнародного Енергетичного Агенства у 2023 році [1]. Урбанізація, ріст населення Землі та антропогенні кліматичні зміни роблять перехід до практик сталого розвитку для всіх сфер людської діяльності не просто актуальним, а життєво необхідним.

На щастя останнім часом зростає інтерес суспільства до проблем зміни клімату та забруднення оточуючого середовища і тому з'являється все більше проєктів направлених на дослідження та розробку нових матеріалів та переробку тих що вже пройшли свій експлуатаційний строк. При цьому залишаються відкритими питання стандартизації оцінки довговічності, теплової інерції та економічної доступності нових матеріалів у різних кліматичних умовах.

Розробка esofriendly матеріалів безпосередньо пов'язане з виконанням цілей Паризької угоди (обмеження росту середньорічної температури повітря до 1,5 градуси Цельсія на рік) та цілей сталого розвитку (ЦУР) ООН. Енергоефективні матеріали скорочують експлуатаційні витрати будівель, покращують мікроклімат житлових приміщень та знижують залежність від викопного палива.



Рис. 1 – Ілюстративне зображення міжнародних домовленостей задля зменшення антропогенного впливу на клімат Землі (виконано ІІІ)

Станом на сьогодні світова наукова спільнота досліджує три основні класи ecofriendly матеріалів, серед них:

Біокомпозити – композитні матеріали які повністю або частково складаються з відновлюваних джерел та є частково біорозкладними. В біокомпозитах використовуються полімерні матеріали вироблені з цукромістких рослин та наповнювачі з природних матеріалів, таких як тирса та рослинні волокна.



Рис. 2 – Зображення одного з видів біокомпозиту (з рослинних волокон)

Повторне використання будівельних матеріалів – повторне використання бетону, наприклад, скорочує викиди вуглекислого газу CO₂ на 30% або на 270 кілограм на кожному вироблену тону нового бетону.

Аерогелі та фазоперехідні матеріали (Phase change materials) – за рахунок високого вмісту повітря надійно “закритого” в структурі аерогелю вдається отримати будівельний матеріал з дуже високими показниками опору теплопередачі та низькою вагою що дозволить додатково економити на конструкційних матеріалах та робити споруди більш компактними. В свою чергу фазоперехідні матеріали ФПМ призначені для акумулювання енергії (наприклад від Сонця) та віддавання її до внутрішніх приміщень будівлі. Такий синтез двох різних технологій дозволить суттєво підвищити енергонезалежність кожної окремої споруди та загальну стійкість систем тепло та електропостачання що відкриє нові горизонти для нових споживачів електричної енергії (таких як електромобілі) без додаткового навантаження на існуючі мережі та генеруючі потужності що додатково позитивно вплине на цілі окремих держав та організацій щодо зниження використання викопних палив та перехід на відновлювані джерела енергії що затребує нових людських ресурсів для будівництва об’єктів відновлюваної енергетики які будуть вивільнені зі спорідненого сектору житлового будівництва.



Рис. 3 – Аерогель

Мета дослідження - сформуванати комплексну методологію та практичні рекомендації щодо вибору та застосування екологічно доброзичливих матеріалів під час будівництва енергоекономічних споруд з огляду на їхні теплотехнічні та екологічні характеристики в рамках оцінки життєвого циклу [2].

Для досягнення мети поставлено такі завдання:

Систематизація наукових даних про термофізичні, механічні та гіротермальні властивості біозаснованих утеплювачів (деревоволокнисті плити, ляне конопачення, овеча шерсть) на основі оглядів останніх п'яти років [3], [7].

Порівняльний аналіз енергоефективності та вуглецевого сліду композитних панелей (деревинно-полімерні та перероблені полімерно-целюлозні матеріали) з традиційними рішеннями на основі екструдованого пінополістиролу та мінеральної вати [5], [8].

Оцінка потенціалу інноваційних синтетичних утеплювачів (аерогелі, спінені еко-полімери) з погляду коефіцієнта теплопровідності, теплової інерції та економічної доцільності їхнього застосування в умовах обмеженого обсягу конструкцій [6].

Інтеграція пасивних стратегій (супергерметичність, рекуперація тепла, високоефективні віконні системи) з екологічними матеріалами для досягнення максимальної енергоекономічності будівель [4].

Розробка рекомендацій для адаптації результатів дослідження до національних стандартів і будівельних норм з урахуванням регіональних кліматичних особливостей та економічних чинників [2].

Матеріал і результати досліджень

1. Біозасновані утеплювачі

Деревоволокнисті плити мають середню теплопровідність $0,038-0,045 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$, демонструючи конкурентоспроможні показники з екструдованим пінополістиролом за меншого споживання енергії для виробництва завдяки використанню поновлюваної сировини та мінімальній переробці [3]. Ляні біокомпозити характеризуються теплопровідністю близько $0,040 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$ і гігроскопічністю, що забезпечує природне регулювання вологості в приміщенні [7]. Овеча шерсть має коефіцієнт теплопередачі близький до $0,035 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$ і високу стійкість до біодеструкції за умови правильної обробки антисептиками на натуральній основі [7]. Так само це дасть змогу зберегти і вивести на новий рівень традиційне скотарство, властиве багатьом народам нашої плени, в якому задіяна величезна кількість людей, в умовах скорочення попиту на одяг, виготовлений з овечої вовни.

2. Композитні панелі на основі деревини та перероблених полімерів

Структурно-ізоляційні панелі (СІП) з орієнтовано-стружкових плит із шаром спіненого полімеру демонструють теплопровідність, близьку до $0,030 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$, а їхнє застосування скорочує теплові втрати до 20 % у порівнянні з класичними щитовими конструкціями. Композити з целюлозною матрицею і переробленим поліетиленом мають теплопровідність, близьку до $0,028 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$, і демонструють до 30 % економії енергії на опалення завдяки меншій дії нерівномірності ізоляції на стику плит і пружності матеріалу, що полегшує стикування елементів [8].



Рис. 4 – Будова структурно-ізоляційної панелі

3. Інноваційні синтетичні утеплювачі

Аерогелі характеризуються рекордно низькою теплопровідністю - менше ніж $0,015 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$, що дає змогу використовувати мінімальну товщину шару за збереження високої теплоізоляції. Однак необхідно враховувати їхню високу вартість (до 100 €/м^2) і чутливість до вологи, що вимагає застосування захисних пароізоляційних шарів і, відповідно, перегляду підходу до проектування житлових будівель [6]. Спінені еко-полімери забезпечують теплопровідність близьку до $0,020 \text{ Вт/(м}^*\text{К)}$ і створюють безшовний утеплювальний шар, що дає змогу додатково знизити тепловтрати будівлі і спростити монтаж.

Ecofriendly матеріали демонструють високий потенціал для зниження як експлуатаційної, так і вбудованої енергії в будівлях, що критично для досягнення кліматичних цілей і сталого розвитку індустрії будівництва [2], [5]. Основні напрямки подальших досліджень включатимуть:

- Розвиток і стандартизація методик оцінювання життєвого циклу для екоматеріалів з урахуванням регіональних особливостей та економічних чинників.
- Оптимізація поєднання біомасових, композитних і синтетичних рішень для досягнення балансу вартості, довговічності та термодіагностики.
- Розроблення рекомендацій для перегляду національних будівельних норм у бік інтеграції пасивних та екологічних стратегій.



Рис. 5 – агітаційний плакат «Глобальні цілі сталого розвитку»

Список літератури

1. Міжнародне Енергетичне Агенство (МЕА), Global Status Report for Buildings and Construction 2023. Paris: IEA Publications, 2023. [Онлайн ресурс]. Джерело: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2023>. Доступ отримано: 23 квітня 2025 року.
 2. М. М. Харсен, Ф. Г. Бенфілл, Д. Ф. Мензіс, "Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review," Sustainability, Т. 1, №3, с. 674–701, 2009 р.
 3. Д. Ф. Мензіс, С. Туран, Ф. Г. Бенфілл, "Life-cycle assessment and embodied energy: A review," Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater., Т. 160, № 4, с. 1–9, 2007 р.
 4. Р. Браун, Х. Бабаізадех, А. Закерсалехі "Integrated life cycle energy and greenhouse gas analysis of exterior wall systems for residential buildings," Sustainability, Т. 6, № 12, с. 8592–8603, 2014 р.
 5. М. Комоді, С. Москардини, Л. Апреа, "Performance evaluation of thermal insulation materials: A life cycle assessment study," J. Clean. Prod., Т. 297, с. 126–623, 2021 р.
 6. С. Люцці, К. Рубіно, Ф. Мартеллотта, П. Стефаніцці, "Wool waste used as sustainable nonwoven for building applications," J. Clean. Prod., Т. 289, с. 125–610, 2021 р.
 7. Е. П. Айгбоміан, М. Фан, "Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper," Constr. Build. Mater., Т. 38, с. 238–245, 2013 р.
 8. Б. Манділі, М. Тахі, А. Ель Буарі, М. Ерруайті, "Experimental study of a new ecological building material for a thermal insulation based on waste paper and lime," Constr. Build. Mater., Т. 210, с. 139–147, 2019 р.
-
1. International Energy Agency (IEA), Global Status Report for Buildings and Construction 2023. Paris: IEA Publications, 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-status-report-for-buildings-and-construction-2023>. Accessed: Apr. 23, 2025.
 2. М. М. Khasreen, P. F. Banfill, and G. Menzies, "Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review," Sustainability, vol. 1, no. 3, pp. 674–701, 2009.
 3. G. F. Menzies, S. Turan, and P. F. Banfill, "Life-cycle assessment and embodied energy: A review," Proc. Inst. Civ. Eng. Constr. Mater., vol. 160, no. 4, pp. 1–9, 2007.
 4. R. Broun, H. Babaizadeh, and A. Zakersalehi, "Integrated life cycle energy and greenhouse gas analysis of exterior wall systems for residential buildings," Sustainability, vol. 6, no. 12, pp. 8592–8603, Dec. 2014.
 5. M. Comodi, S. Moscardini, and L. Aprea, "Performance evaluation of thermal insulation materials: A life cycle assessment study," J. Clean. Prod., vol. 297, p. 126–623, Jan. 2021.
 6. S. Liuzzi, C. Rubino, F. Martellotta, and P. Stefanizzi, "Wool waste used as sustainable nonwoven for building applications," J. Clean. Prod., vol. 289, p. 125–610, Jun. 2021.
 7. E. P. Aigbomian and M. Fan, "Development of Wood-Crete building materials from sawdust and waste paper," Constr. Build. Mater., vol. 38, pp. 238–245, Mar. 2013.
 8. B. Mandili, M. Taqi, A. El Bouari, and M. Errouaiti, "Experimental study of a new ecological building material for a thermal insulation based on waste paper and lime," Constr. Build. Mater., vol. 210, pp. 139–147, Sep. 2019.

СЕКЦІЯ 2.

**ІНЖИНІРИНГ ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ ТА МЕХАТРОННИХ
КОМПЛЕКСІВ**

УДК 665.7

К. В. Фута, аспірант
Кафедра АЕМК, НН ІЕЕ
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІЛЬКОСТІ ТА ЯКОСТІ ВИХІДНИХ ПРОДУКТІВ В РЕЗУЛЬТАТІ ПЕРЕРОБКИ ГУМОВИХ ВІДХОДІВ РІЗНИХ ТИПІВ МЕТОДОМ ПІРОЛІЗУ

Анотація. У роботі розглянуто процес термічної переробки гумових відходів методом піролізу як перспективний напрям у рамках концепції економіки сталого розвитку. Дослідження спрямоване на порівняльний аналіз двох типів сировини — автомобільних шин і гумових деталей транспортних засобів. Представлено технічні характеристики вихідного матеріалу, умови проведення піролізу та кількісний і якісний склад отриманих продуктів. Проведено спектральний, хроматографічний та елементний аналіз піролізних фракцій. Визначено вплив складу сировини на вихід рідкої, газоподібної та твердої фаз. Особливу увагу приділено можливому вторинному використанню продуктів, зокрема піролізного масла, технічного вуглецю та газу. Отримані результати можуть бути використані для подальшої оптимізації процесів переробки та впровадження ефективних технологій утилізації гумових відходів у промислових масштабах.

Ключові слова: гумові відходи, переробка, піроліз, піролізна рідина, вуглець.

Вступ. У контексті постійно зростаючого обсягу відходів та необхідності впровадження принципів циркулярної економіки, питання переробки гумових матеріалів, зокрема шин та інших гумотехнічних виробів, потребує особливої уваги.

Традиційні методи боротьби з ними, такі як спалювання чи захоронення, мають суттєві екологічні недоліки [1], [2]. Одним з перспективних рішень є термічна переробка гумових відходів методом піролізу [3]. Цей підхід дозволяє отримувати корисні вторинні продукти. Зокрема рідке паливо, газову фракцію та твердий залишок (технічний вуглець).

Однак ефективність піролізного процесу значною мірою залежить від типу вихідної сировини, умов проведення процесу та особливостей застосованого обладнання. Вивчення кількісних і якісних показників отриманих продуктів дозволяє оцінити доцільність переробки різних типів гумових відходів та визначити оптимальні технологічні параметри.

Мета та завдання. Метою даної роботи є дослідження та систематизація інформації стосовно сучасних підходів і технологій в області переробки гумових відходів методом піролізу. Для аналізу необхідних показників продуктів переробки потрібно розглянути умови проведення процесу. Після чого порівняти отримані результати для вибраних типів відходів задля можливості подальшого корегування технологічних аспектів виробництва.

Матеріал і результати досліджень. Для проведення порівняльного аналізу кількості та якості вихідних продуктів піролізу гумових відходів було обрано два типи сировини:

1. Автомобільні шини — використані шини легкових та вантажних автомобілів, з мінімальними залишками від сталевих кордів (попереднє відділення металу). Основні компоненти: натуральний каучук (NR), стирол-бутадієновий каучук (SBR), вуглецевий наповнювач (вуглець технічний), сірка, масла, метали.

2. Гумові деталі автомобіля — ущільнювачі, прокладки, гумові манжети та інші деталі, що містять в основному синтетичні каучуки, такі як SBR (стирол-бутадієнний каучук).

Таблиця 1 – Основні складові і технічні показники гумових відходів у вихідному стані.

Показник	Автомобільні шини	Гумові деталі автомобіля
Вологість, %	0.9	1.2
Вміст летких речовин, %	62.3	55.6
Зольність, %	8.7	12.4
Вуглець, % (елементний аналіз)	75.1	69.8
Водень, %	7.8	6.5
Сірка, %	1.9	2.4
Температура розкладу, °C	420–550	380–560

Як бачимо з наведеної вище таблиці 1, різні типи гумових відходів відрізняються по своєму складу та умовам проведення процесу піролізу. Навіть незначні відмінності кожного з параметрів будуть впливати на кінцеві результати випробування.

Для проведення дослідження використовувалась установка періодичної дії з герметичним сталевим реактором. Зразки було попередньо підготовлено шляхом подрібнення до фракції розміром 20–30 мм, що забезпечувало більш рівномірний прогрів матеріалу. Нагрівання проводилось за рахунок газових пальників з альтернативною можливістю використання електричних ТЕНів. Відведення піролізних газів та їх конденсація здійснювалися через охолоджувачі і газозбірник.

Умови процесу:

- Кінцева температура: 550 ± 10 °C
- Швидкість нагрівання: 10 °C/хв
- Тривалість витримки: 90 хв
- Середовище: безкисневе, азот

Кількість та якість кожної фракції визначалися за допомогою стандартних методів: масова частка, елементний склад, спектроскопічний та хроматографічний аналіз.

Таблиця 2 – Результати виходу продуктів по завершенню процесу піролізу

Тип відходу	Рідка фракція (%)	Газоподібна фракція (%)	Тверда фракція (%)	Середня теплота згоряння рідини (МДж/кг)
Автомобільні шини	45	20	35	42.3
Гумові деталі автомобіля	35	33	32	37.1

В таблиці 2 бачимо, що автомобільні шини продемонстрували вищий вихід рідкої та твердої фракцій. В той час як гумові деталі утворили більший відсоток газоподібного продукту. Це пояснюється різним складом сировини: шини містять більше вуглеводневої основи та оліфінів, а допоміжні деталі — більше додаткових наповнювачів, сірки.

Таблиця 3 – Основні сполуки рідкої фракції

Компонент	Автошини, %	Гумові деталі, %
Лимонен	4.3	1.7
Бензол	11.2	14.5
Толуол	6.7	8.3
Ксилоли (о-, м-, п-)	4.4	6.2
Аліфатичні алкани	17.5	15.3
Циклопарафіни	3.2	4.1

Рідка фракція. Хімічний аналіз рідкої фракції показав наявність у складі переважно вуглеводнів, включаючи широкий спектр ароматичних (бензол, толуол та ксилол) та аліфатичних сполук [4]. Основні компоненти і їх кількість наведені у таблиці 3 вище. Піролізна рідина із шин характеризується вищою теплотворною здатністю (~42 МДж/кг) і меншим вмістом сірки (~0,9%), порівняно з рідиною, отриманою з гумових деталей (теплотворна здатність ~37 МДж/кг, вміст сірки ~1,4%) [5]. Можна виділити, що рідка фракція обох зразків містить лимонен - важливий інтермедіат у хімічній промисловості.

Таблиця 4 – Основні компоненти твердої фракції

Показник	Автошини	Гумові деталі
Вміст фіксованого С, %	82.4	74.3
Зола, %	8.7	12.4
Сірка, %	1.1	2.2
Поверхнева площа (BET), м ² /г	95.6	73.2

Тверда фракція (технічний вуглець). Складається переважно з вуглецю та неорганічних домішок, таких як сірка та оксиди металів [6] (див. табл. 4). Отриманий твердий залишок має характеристики наближені до технічного вуглецю. Його потенційне застосування – наповнювач для гумових виробів, у різного типу фільтраційних системах, інших промислових процесах. Залишок від шин має більш виражену пористу структуру, та меншу кількість сірки, що є його перевагами. У той час як залишок від гумових деталей автомобіля містить більше домішок мінерального походження.

Таблиця 5 – Основні компоненти газоподібної фракції

Газ	Автошини, %	Гумові деталі, %
Метан	40.1	36.7
Етан	15.3	14.5
Пропан	8.7	7.9
Водень	1.2	1.5
CO + CO ₂	6.4	8.1
Інші вуглеводні	28.3	31.3

Газоподібна фракція. Містить в основному метан, етилен, пропан та інші легкі вуглеводні. Згідно з дослідженнями, переробка піролізним методом автомобільних шин, так само як і гумових деталей автомобіля, дає газоподібну фракцію з вмістом метану до 40% [7]. Цей газ може бути використаний для енергозабезпечення процесу піролізу, що підвищує енергоефективність процесу або як сировина для хімічної промисловості.

Таблиця 6 – SWOT-аналіз піролізу обраних гумових відходів

Категорія	Автомобільні шини	Гумові деталі автомобіля
Сильні сторони	Високий вихід рідини, краща якість вуглецю	Кращий газовий потенціал
Слабкі сторони	Потреба у видаленні металів	Більше золи, сірки у продуктах
Можливості	Регенерація техвуглецю, отримання лимонену	Переробка мілких міксованих гумових відходів
Загрози	Нерівномірність складу різних шин, домішки металу	Ускладнене сортування, наявність сторонніх домішок

Висновки. Зростаючий обсяг гумових відходів, особливо автомобільних шин і технічних гумових виробів, актуалізує потребу в ефективних методах їхньої переробки. Піроліз як термічний спосіб утилізації дозволяє отримати цінні вторинні продукти – рідке паливо, газову фракцію та твердий залишок. Проведене дослідження показало, що хімічний склад сировини безпосередньо впливає на вихід і якість продуктів піролізу. Автомобільні шини продемонстрували в цілому кращі результати – більший вихід та вищу теплотворну здатність рідкої фракції, кращі характеристики технічного вуглецю. Тоді як гумові деталі забезпечили більший вихід газоподібних компонентів. Аналіз показав потенційну доцільність диференційованого підходу до переробки різних типів гумових відходів з урахуванням їх складу. Результати також свідчать про можливість подальшої оптимізації технологічних параметрів процесу (температурні режими, тривалість, якість конденсації, та інше) з метою підвищення енергоефективності та зменшення екологічного навантаження.

Список використаної літератури

1. A. V. Lozhechnik, V. V. Savchin, "Pyrolysis of Rubber in a Screw Reactor," *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 89, no. 6, pp. 1482–1486, Nov. 2016.
2. P. T. Williams, S. Besler, D. T. Taylor, "The pyrolysis of scrap automotive tyres: the influence of temperature and heating rate on product composition," *Fuel*, vol. 69, no. 9, pp. 1474–1482, 1990.
3. W. Han, D. Han, H. Chen, "Pyrolysis of Waste Tires: A Review," *Polymers*, vol. 15, no. 7, p. 1604, Mar. 2023.
4. A. V. Lozhechnik, V. V. Savchin, "Technology of rubber waste treatment," in *Proc. Annual Conf. of Young Scientists on Energy Issues*, CYSENI 2014, Kaunas, Lithuania, 2014.
5. M. A. Rehan, R. Barakat, M. N. Abedini, "Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 116, pp. 542–552, 2018.
6. J. F. González, J. M. Encinar, J. L. Canito, J. J. Rodríguez, "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study," *J. Anal. Appl. Pyrol.*, vol. 58–59, pp. 667–683, 2001.
7. S. S. Z. Salmasi, M. S. Abbas-Abadi, M. N. Haghighi, H. Abedini, "The effect of different zeolite-based catalysts on the pyrolysis of poly butadiene rubber," *Fuel*, vol. 160, pp. 544–548, 2015.

K. Futa, postgraduate student
Department AEMK, ER IESEM
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTITY AND QUALITY OF OUTPUT PRODUCTS FROM PYROLYSIS OF DIFFERENT TYPES OF RUBBER WASTE

Abstract. *The paper explores the thermal processing of rubber waste via pyrolysis as a promising direction within the framework of the sustainable development economy concept. The study focuses on a comparative analysis of two types of raw materials — automobile tires and rubber components of vehicles. Technical characteristics of the initial material, the conditions for pyrolysis, and the quantitative and qualitative composition of the obtained products are presented. Spectral, chromatographic, and elemental analysis of the pyrolysis fractions were conducted. The influence of the raw material composition on the output of liquid, gaseous, and solid phases was determined. Special attention is paid to the potential secondary use of the products, particularly pyrolysis oil, carbon black, and gas. The results obtained can be used for further optimization of recycling*

processes and the implementation of efficient technologies for industrial-scale utilization of rubber waste.

Keywords: rubber waste, recycling, pyrolysis, pyrolysis liquid, carbon.

References

1. A. V. Lozhechnik, V. V. Savchin, "Pyrolysis of Rubber in a Screw Reactor," *J. Eng. Phys. Thermophys.*, vol. 89, no. 6, pp. 1482–1486, Nov. 2016.
2. P. T. Williams, S. Besler, D. T. Taylor, "The pyrolysis of scrap automotive tyres: the influence of temperature and heating rate on product composition," *Fuel*, vol. 69, no. 9, pp. 1474–1482, 1990.
3. W. Han, D. Han, H. Chen, "Pyrolysis of Waste Tires: A Review," *Polymers*, vol. 15, no. 7, p. 1604, Mar. 2023.
4. A. V. Lozhechnik, V. V. Savchin, "Technology of rubber waste treatment," in *Proc. Annual Conf. of Young Scientists on Energy Issues, CYSENI 2014, Kaunas, Lithuania, 2014*.
5. M. A. Rehan, R. Barakat, M. N. Abedini, "Effect of advanced catalysts on tire waste pyrolysis oil," *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 116, pp. 542–552, 2018.
6. J. F. González, J. M. Encinar, J. L. Canito, J. J. Rodríguez, "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study," *J. Anal. Appl. Pyrol.*, vol. 58–59, pp. 667–683, 2001.
7. S. S. Z. Salmasi, M. S. Abbas-Abadi, M. N. Haghighi, H. Abedini, "The effect of different zeolite-based catalysts on the pyrolysis of poly butadiene rubber," *Fuel*, vol. 160, pp. 544–548, 2015.

UDC 621.311

A.R. Trachuk

Department of Automation of Electrical and Mechatronic Complexes,
Educational and Scientific Institute of Energy Saving and Energy Management of the
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

RISK ANALYSIS AND WAYS TO NEUTRALIZE THEM TO INCREASE THE LEVEL OF ENERGY SECURITY IN THE RENEWABLE ENERGY SECTOR OF UKRAINE

Annotation. The article examines key internal and external threats to Ukraine's energy security in the context of the development of renewable energy sources. In particular, the impact of geopolitical factors, such as the armed aggression of the Russian Federation, on the energy infrastructure is examined, as well as technical problems, in particular the obsolescence of infrastructure and energy storage technologies. Special attention is paid to cyber threats, which are constantly growing with the development of digital technologies in the energy sector. In addition, economic barriers, such as the instability of energy prices on international markets, which can significantly affect the stability of the energy system, are analyzed.

An important problem is the imperfection of the legislative framework, which does not meet new challenges, as well as insufficient financial support for the renewable energy sector. The article proposes a number of strategic and organizational and technical measures aimed at reducing risks to energy security. Among them are infrastructure modernization, improvement of management processes, introduction of the latest energy storage technologies, and creation of a single digital platform for monitoring energy resources.

One of the key recommendations is to strengthen the regulatory framework, which will allow it to adapt to modern requirements. It is also important to strengthen cooperation with international partners, which will allow the exchange of experience and technologies to increase the resilience of energy systems. In the context of the digital transformation of the industry, it is necessary to increase attention to cybersecurity to protect critical infrastructure from cyberattacks.

Thus, to ensure Ukraine's energy security in the context of the development of renewable energy, it is necessary to implement a set of measures that include both infrastructure modernization and legislative improvement, as well as the integration of international technologies and experience.

Keywords: energy security, renewable energy, threats, cybersecurity, sustainable operation, energy strategy, Ukraine.

Introduction. The issue of energy security has become strategically important for Ukraine, particularly in the context of the current full-scale war and significant dependence on imported energy resources. Given these circumstances, ensuring the country's energy independence is of crucial importance for the stability and development of the state. Renewable energy is one of the main areas that can significantly reduce Ukraine's dependence on external energy suppliers, as well as strengthen the energy infrastructure. The use of renewable energy sources, such as solar, wind, biomass and geothermal energy, allows Ukraine not only to reduce the negative impact on the environment, but also to provide itself with a more stable and reliable energy system. This is also an important element of the transition to an economy based on sustainable development.

However, despite the huge potential of renewable energy, this sector faces a number of serious challenges that may hinder the achievement of the goals set within the framework of Ukraine's energy strategy. External threats, such as aggression from the Russian Federation and geopolitical instability, directly affect the energy infrastructure, while technical limitations, such as the insufficient level of

development of energy storage infrastructure, impair the opportunities for the effective use of renewable sources. In addition, the internal energy grid is not always able to integrate these new energy sources due to outdated equipment and technologies.

An equally serious problem is the growth of cyber threats, as the process of digitalization of energy networks makes them vulnerable to attacks that can lead to serious disruptions in the operation of critical infrastructure. Added to this are economic barriers, including instability in international energy markets, high costs of technology and the lack of necessary financial resources for the development of the industry. In particular, investments in renewable energy are critical to ensure its sustainable development, but they are insufficient due to difficult economic conditions.

The issues of energy diversification, climate change adaptation and digitalization of energy processes are already actively discussed in scientific circles. However, the problems associated with specific risks in the renewable energy sector and possible ways to eliminate them remain insufficiently studied. This creates a need for additional scientific and technical developments that will allow not only to assess these risks, but also to find optimal solutions for their neutralization, thereby ensuring the reliability and security of the country's energy system.

Purpose and objectives of the study The aim of the article is to identify current threats to Ukraine's energy security in the field of renewable energy and develop comprehensive ways to overcome them. The main tasks are: systematization of threat types; assessment of their impact on the industry; formulation of practical recommendations for minimizing risks.

Materials and research results. The threats facing Ukraine's energy security in the field of renewable energy are not just multifaceted, but extremely deep systemic in nature, covering not only the technical, economic, informational and personnel aspects, but also concern the foundations of public administration, strategic planning, international cooperation, legal regulation, as well as social trust and environmental responsibility. The materials and results of the study showed that threats are conventionally divided into external and internal, but in real life this division is very conditional, since most risks are interconnected, intertwined and reinforce each other. That is why, for their effective analysis and neutralization, a systemic integrated strategy is necessary, taking into account each of the areas in all its complexity, in the dynamics of change and in the context of modern challenges.

External threats primarily include the full-scale armed aggression of the Russian Federation, which has become a decisive factor in the destabilization of the energy sector in general and renewable energy in particular. Constant shelling, targeted destruction of critical infrastructure facilities, including solar and wind power plants, substations, transformer nodes, power lines, have led to the fact that in many regions of the country it has become impossible not only to produce, but also to effectively transport energy. In addition to physical destruction, there is also a factor of the constant threat of a second strike, which significantly complicates or makes impossible investment, strategic planning and even elementary maintenance of facilities. No less powerful threat are global price fluctuations on world markets. They concern not only the cost of energy resources as such, but also the costs of logistics, equipment imports, debt servicing, and the supply of components for energy systems. Another serious problem is the limited access to the latest technologies due to sanctions, technological barriers, restrictions on the part of manufacturers or competitive interests of exporting countries, which hinders the modernization of infrastructure and the introduction of innovations. The war, which is being waged not only on the battlefield, but also in the information and economic space, creates a large-scale destabilizing effect that has no analogues in the modern history of European energy systems.

Among the internal threats, the most painful is the lack of a sufficiently developed infrastructure for energy storage. In the conditions of working with renewable sources, which are not stable in production — after all, the sun does not shine at night and the wind does not blow constantly — it is impossible to ensure reliable energy supply without powerful storage systems. In Ukraine, these technologies are still in their infancy, individual projects cannot cover the overall system needs,

and state policy in this area is either absent or extremely fragmented. The problem of personnel shortage is also extremely critical: qualified specialists capable of designing, implementing and maintaining modern energy systems are lacking in all regions. The educational system does not keep up with the pace of change, and young specialists, having acquired their first skills, often go abroad in search of better conditions, which increases the brain drain. Outdated technical solutions still in use in many facilities are neither efficient nor secure, and modernization requires investments that most operators simply do not have. Added to this is the near-catastrophic cybersecurity situation - critical infrastructure management systems often lack even basic protection, let alone modern cryptographic protocols, intrusion response, threat analytics, or trained rapid response teams.

No less serious is the legal and financial and credit crisis in the industry. Ukrainian legislation, although it has undergone certain changes in the direction of harmonization with European standards, still remains fragmented, outdated and does not meet the requirements of flexibility in the face of crisis changes. The lack of long-term strategies, excessive regulation or, conversely, a legal gap regarding new technologies create legal uncertainty, which is one of the main risk factors for investors. Banks, credit institutions and financial funds provide financing on unfavorable terms or do not risk entering the renewable energy sector at all, because they do not have guarantees of return on investment, asset protection and transparent judicial protection of their rights. As a result, instead of explosive growth, we have stagnation, where individual heroic projects do not change the overall picture of stagnation.

However, even under such difficult conditions, there are effective ways to neutralize threats, which, provided political will, professional management and broad public support, can radically change the situation. First of all, the development of energy storage systems should become a national priority. Investments in battery installations, hydrogen technologies, gravitational storage, superconducting windings or other promising solutions should be supported both by the state and through international funds. It is necessary to create a single digital energy space that will ensure transparent, integrated, flexible management of all energy flows in the country. Such a platform will not only optimize generation and consumption, but will also provide full monitoring, diagnostics and forecasting of problems in real time.

A separate direction is strengthening the regulatory framework. This is not only about updating existing laws, but also about creating fundamentally new framework acts that take into account the rapid change of technologies, force majeure circumstances of wartime, the need for international standards and partnership. Ukraine must move from reactive to proactive law. Attracting international technical assistance is another extremely important tool, in particular in the field of policy development, personnel training, equipment modernization and the implementation of new approaches. We must use every opportunity to join grant programs, partnership initiatives, and strategic alliances.

Finally, cybersecurity is not an optional addition to digitalization, but its core. All infrastructure projects, all digital services, all management systems must be protected at the level of military standards. This means a multi-layered authentication system, data encryption, constant penetration testing, regular updates and backup scenarios.

Thus, only through a systemic, comprehensive approach that takes into account all internal and external factors, combining technology, politics, law, finance, education, and security, is it possible to ensure long-term, sustainable, and independent energy security of Ukraine in the field of renewable energy.

Conclusions Ensuring a high level of energy security in the renewable energy sector of Ukraine is not just a desirable vector of development, but a critically necessary condition for the sustainable existence of the state in the face of growing geopolitical, man-made, economic and cyber threats. The study proves that the key factor in increasing the resilience of the energy sector to modern challenges is the use of a comprehensive, integrated approach to identifying, assessing, preventing and neutralizing risks. This is not only about the technical re-equipment of the industry, but also about

a deep strategic transformation of all subsystems that form the contour of national energy security. At the heart of such an approach should be the synergy of institutions, the harmonization of national legislation with European standards, the systematic updating of regulatory and legal acts taking into account dynamic changes in the energy environment, as well as the construction of a flexible system of state risk management, capable not only of promptly responding to challenges, but also of proactively anticipating them.

One of the basic components of such a system is the targeted modernization of the energy infrastructure with a priority on the development of high-tech facilities for the generation, storage, transportation and distribution of energy from renewable sources. The development of energy storage capacities, the implementation of smart grids, automated monitoring and protection systems, which allow increasing the flexibility and adaptability of the energy system to unstable external conditions, are of particular relevance. Along with this, it is critically important to form a competent human resource potential in the industry, implement educational programs with an emphasis on cybersecurity, digital technologies, climate resilience and risk management in renewable energy.

It is impossible to ignore the importance of international cooperation, in particular, involving the experience of EU member states, participation in interstate energy initiatives, implementation of joint technology transfer projects and investment in common infrastructure. It is international integration that opens up access to modern financial and credit instruments, facilitates the exchange of best practices, and stimulates compliance with high standards of transparency, environmental friendliness and technological efficiency.

The results of the study also indicate the feasibility of developing a national methodology for scenario analysis of the energy system's resilience. It is necessary to create a set of dynamic models that allow predicting the behavior of the industry under various risks - from large-scale military conflicts to long periods of natural disasters or fluctuations in global markets. Such a toolkit should be supplemented by a system of energy indicators - quantitative and qualitative markers that visualize the level of security, resilience and adaptability of the sector.

The assessment of the effectiveness of the implemented measures must also move to a qualitatively new level - based on evidence-based approaches, involving big data, multi-criteria analysis, machine learning and predictive analytics. Only such an approach will allow to identify gaps in real time, adjust strategies and maintain stability in a dynamic environment.

In general, increasing the level of energy security in the renewable sector is not a one-time event, but a long-term process that requires systemic political will, interagency coordination, scientific and technical support, and broad public consensus. Only under the condition of such a comprehensive transformation will Ukraine be able not only to reduce its energy vulnerability, but also to form a solid foundation for sustainable development, environmental responsibility, and national sovereignty in the energy sphere.

References

1. State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. (2023). Report on the State of Renewable Energy. <https://saee.gov.ua/en>
2. Law of Ukraine "On Alternative Energy Sources". Verkhovna Rada of Ukraine, 2021. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555/2012>
3. Energy Strategy of Ukraine until 2035. Cabinet of Ministers of Ukraine, 2017. <https://www.kmu.gov.ua/en/news/energy-strategy-of-ukraine-until-2035>
4. International Energy Agency. (2022). Renewables 2022 Report. <https://www.iea.org/reports/renewables-2022>
5. EU4Energy. (2021). Policy reforms in Ukraine's energy sector. <https://euforenergy.eu/>
6. UNDP Ukraine. (2023). Energy Security and Green Transition. <https://www.ua.undp.org/content/ukraine/en/home.html>
7. IEEE Smart Grid. (2022). Cybersecurity Challenges in Renewable Energy Integration.

<https://smartgrid.ieee.org>

8. World Bank. (2020). Ukraine Energy Sector Overview. <https://www.worldbank.org/en/country/ukraine>

9. State Statistics Service of Ukraine. (2022). Energy Security Statistics. <http://www.ukrstat.gov.ua/>

10. Ministry of Energy of Ukraine. (2021). Draft Strategy for Renewable Energy Development. <https://mev.gov.ua/en>

11. European Union. (2021). Energy Policy Assessment of Ukraine and its Alignment with EU Standards. <https://europa.eu/>

12. National Institute for Strategic Studies. (2022). Energy Security of Ukraine in Times of War. <https://niss.gov.ua/en>

13. Deloitte. (2022). Future of Renewable Energy in Ukraine. <https://www2.deloitte.com/global/en/industries/energy-resources-and-industrials.html>

УДК 681.5

О.О. Тригубець¹, студентА. В. Торопов¹, к.т.н., доцент¹Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ОДНОКОНТУРНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ШВИДКІСТЮ ТЕЛЕСКОПІЧНОГО КОНВЕЄРА ЛОГІСТИЧНОГО ХАБУ

Анотація. У статті представлено проєкт системи інтелектуального керування телескопічним конвеєром, із використанням програмованого логічного контролера (ПЛК). Програма контролера містить блок регулювання швидкості, реалізацію функцію енергозбереження та автоматичної сигналізації у випадку виникнення нештатних ситуацій. Завдяки ПЛК забезпечується загальне управління електротехнічним комплексом, а частотний перетворювач дозволяє досягти високої точності й ефективності. Такий підхід відповідає сучасним вимогам автоматизації, безпеки та енергоефективності.

Ключові слова: Одноконтурне керування швидкістю, програмований логічний контролер, телескопічний конвеєр, ПД – регулятор, логістичний хаб.

Вступ:

У зв'язку з розвитком систем автоматизації в галузі логістичних переміщень зростає потреба в телескопічних конвеєрах [1]. Їх використання при розвантажуванні та завантаженні сідлових автопоїздів (фур) ускладнюється — часом виникає режим тривалої роботи без навантаження або блокування системи через заклинювання стрічки. Щоб уникнути таких проблем, в роботі пропонується застосування фотоелектричних датчиків, які визначають поточну швидкість конвеєра. Отриманий сигнал передається на ПЛК, який приймає рішення щодо зупинки обладнання та вмикає звукову й світлову сигналізацію [2,3].

Через безперервну роботу, нестабільну швидкість двигуна та високе енергоспоживання обладнання для регулювання швидкості конвеєра доцільно використовувати частотні перетворювачі. Запропонована система керування на базі ПЛК та частотного перетворювача дозволяє значно підвищити стабільність роботи конвеєра та знизити витрати енергії.

Застосування ПД-алгоритму в ПЛК забезпечує автоматичне регулювання швидкості за принципом зворотного зв'язку, дозволяючи точно контролювати роботу двигуна та ефективно вмикати або вимикати обладнання залежно від умов [4,5].

Мета та завдання. Метою даної статті є визначення можливості застосування одноконтурної системи керування швидкістю для телескопічних конвеєрів. Для цього необхідно провести математичне моделювання з урахуванням особливостей реалізації такої системи керування на основі ПЛК.

Матеріал і результати досліджень. Щоб забезпечити стабільну швидкість руху, використовується система ПЛК у поєднанні з частотним перетворювачем. Контролер задає необхідну швидкість, встановлює зв'язок із перетворювачем через інтерфейс RS-485. Частотний перетворювач керує роботою двигуна, тоді як фотоімпульсний датчик фіксує реальну швидкість, передаючи сигнали до ПЛК. Контролер аналізує отримані дані й коригує швидкість, забезпечуючи точне дотримання заданих параметрів. Контур регулювання швидкості двигуна конвеєра при використанні спрощеної моделі електричної машини приймає вигляд, представлений на рис.1 [6].

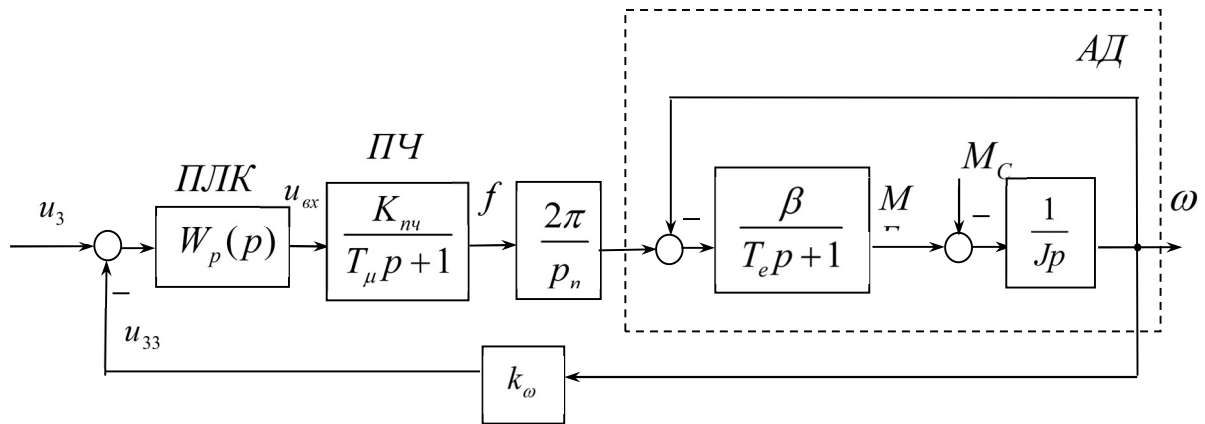


Рисунок 1 - Структурна схема системи керування швидкістю стрічки

На рисунку 1 введені наступні позначення: $W_p(p)$ - передаточна функція регулятора швидкості; K_{nc} - коефіцієнт підсилення перетворювача частоти; T_μ - некомпенсована стала часу перетворювача частоти; J - момент інерції двигуна; β - жорсткість механічної характеристики на робочій ділянці; T_e - електромагнітна стала часу.

Після перетворень при $M_C = 0$ передавальна функція двигуна зводиться до вигляду

$$W_{AD}(p) = \frac{1}{T_e J \beta^{-1} p^2 + T_e \beta^{-1} p + 1}, \quad (1)$$

Розглянемо основні варіанти регуляторів. У випадку застосування П- регулятора швидкості величина його коефіцієнта передачі вибирається на основі вимог щодо статичної точності

$$k_p = \frac{M_H}{\beta k_\omega K'_{nc} \Delta \omega_{CT}} - \frac{1}{k_\omega K'_{nc}}, \quad (2)$$

де $\Delta \omega_{CT}$ - допустиме значення відхилення швидкості при номінальному навантаженні (при розрахунку рекомендується вибрати не більше 2% від номінальної швидкості);

$K'_{nc} = \frac{2\pi}{p_n} K_{nc}$ - приведений коефіцієнт підсилення перетворювача.

При моделюванні перехідних процесів відбувається уточнення величини k_p таким чином, щоб забезпечити необхідні динамічні показники якості регулювання. При цьому сімейство статичних характеристик описується рівнянням прямої

$$\omega = \frac{K'_{nc} k_p}{(1 + K'_{nc} k_p k_\omega)} u_3 - \frac{1}{\beta(1 + K'_{nc} k_p k_\omega)} M, \quad (3)$$

При інерційності механічної частини суттєво більшої ніж електричної стандартне налаштування контуру швидкості на модульний оптимум забезпечує ПІ- регулятор

$$W_p(p) = k_p \frac{T_p p + 1}{T_p p}, \quad (4)$$

Статичні характеристики при цьому паралельні осі абсис і описуються рівнянням

$$\omega = \frac{1}{k_\omega} u_3. \quad (5)$$

Якщо інерційності є співрозмірними, то для забезпечення настроювання на модульний оптимум необхідне застосування ПІД – регулятора [7].

При цьому ПІД регулятор визначається передавальною функцією

$$W_p(p) = \frac{T_e J \beta^{-1} p^2 + T_e \beta^{-1} p + 1}{2T_\mu k_\omega K'_{nc} p}. \quad (6)$$

Дослідження перехідних процесів за швидкістю при використанні різних типів регуляторів можливе із використанням математичного пакету MATLAB та його додатку Simulink.

Дослідження проведено для двигуна потужністю 7,5кВт і синхронною частотою обертання 2935 об/хв типорозміру 132М.

Для цього двигуна отримаємо наступні параметри:

$$\beta = M_n / (\omega_0 - \omega_n) = \frac{30}{\pi} M_n / (n_0 - n_n) = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{24,4}{65} = 3,585; \quad T_e = 0,011c;$$

$J = 0,0235 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$; $p_n = 1$. Графіки перехідних процесів за швидкістю приймають вигляд, представлений на рис.2а (П – регулятор) та рис.2б (ПІД – регулятор).

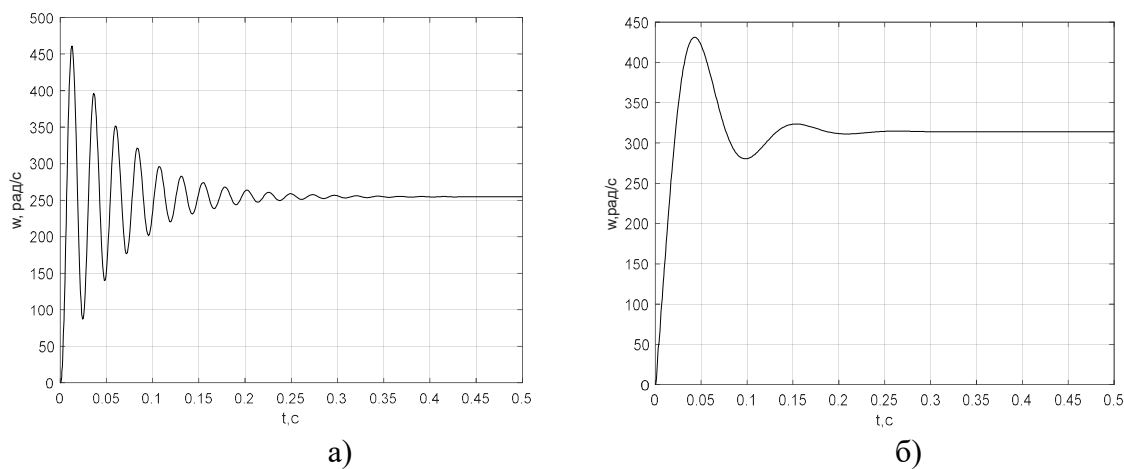


Рисунок 2. Графіки перехідних процесів за швидкістю при використанні різних типів регуляторів.

Висновки.

1. Застосування П – регулятора, навіть за умови простоти реалізації на програмованому логічному контролері, для телескопічних конвеєрів логістичних хабів не є доцільною, оскільки призводить до суттєвих коливань стрічки.
2. Реалізація керування швидкістю із застосуванням ПІД – регуляторів для телескопічних конвеєрів логістичних хабів є можливим і забезпечує достатню точність регулювання.
3. Використання одноконтурних систем керування швидкістю стрічки конвеєрів дозволяє здійснити просту практичну реалізацію системи на базі програмованого логічного контролера.

Список використаної літератури

1. Колесніков, М. Ю. Оптимальне керування електроприводом конвеєрної установки змінної довжини : магістерська дис. : 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Колесніков Михайло Юрійович. – Київ, 2024. – 96 с.
2. Cheng, Xiao & Wan, Jie. (2013). Retractable Conveyor Control System Design Based on PLC. Advanced Materials Research. 655-657. 1332-1336. 10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.1332.

3. Daspute, Ravindray, et al. "Study on Loading and Unloading Telescopic Conveyor." *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2019, pp. 1-3.
4. Торопова, Л., Дін, Ч., Басалкевич, С., Зозуля, Р., Гостило, А., Зелінський, В. (2023). Дослідження динамічних властивостей електромеханічних комплексів з використанням спрощених математичних моделей в енергетиці та транспорті. Збірник матеріалів конференції: "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку–PEMS", 105-106.
5. Rozali, S. M., Ruslan, E., Ramli, R., Kamarudin, M. N., & Rahmat, M. F. (2024). Development of Pid Controller for Conveyor Belt System with Different Tuning Method. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 14(12), 4139–4153.
6. Wang, Y., Kou, Z., & Wu, L. (2024). Optimization of PID Control Parameters for Belt Conveyor Tension Based on Improved Seeker Optimization Algorithm. *Electronics*, 13(19), 3907. <https://doi.org/10.3390/electronics13193907>
7. PID Controller Closed Loop Conveyor // URL: <https://www.scribd.com/document/468805562/PID-Controller-Closed-Loop-Conveyor#> (дата звернення: 01.04.2025).

O, Tryhubets¹, student
A. Toropov¹, Phd, Associate Professor
¹**National Technical University of Ukraine**
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

SINGLE-LOOP SPEED CONTROL SYSTEM FOR TELESCOPIC CONVEYOR OF LOGISTICS HUB

Abstract. *The article presents a project of an intelligent control system for a telescopic conveyor using a programmable logic controller (PLC). The controller program contains a speed control unit, implementation of the energy saving function and automatic signaling in case of emergency situations. Due to the PLC, general control of the electrical complex is ensured, and the frequency converter allows achieving high accuracy and efficiency. This approach meets the modern requirements of automation, safety and energy efficiency.*

Keywords: *Single-loop speed control, programmable logic controller, telescopic conveyor, PID controller, logistics hub.*

References

1. M. Yu. Kolesnikov, *Optymalne keruvannia elektropryvodom konveirnoi ustanovky zminnoi dovezhy: mahisterska dys.* Kyiv, 2024, 96 p.
2. Cheng, Xiao & Wan, Jie. (2013). Retractable Conveyor Control System Design Based on PLC. *Advanced Materials Research*. 655-657. 1332-1336. 10.4028/www.scientific.net/AMR.655-657.1332.
3. Daspute, Ravindray, et al. "Study on Loading and Unloading Telescopic Conveyor." *International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology*, 2019, pp. 1-3.
4. L. Toropova, C. Din, S. Basalkevych, R. Zozulia, A. Gostylo, and V. Zelinskyi, "Doslidzhennia dynamichnykh vlastyvostei elektromechanichnykh kompleksiv z vykorystanniam sproshchenykh matematichnykh modelei v enerhetytsi ta transporti," in *Proc. Conf. Enerhetychnyi menedzhment: stan ta perspektyvy rozvytku–PEMS*, 2023, pp. 105–106.

5. Rozali, S. M., Ruslan, E., Ramli, R., Kamarudin, M. N., & Rahmat, M. F. (2024). Development of Pid Controller for Conveyor Belt System with Different Tuning Method. *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, 14(12), 4139–4153.
6. Wang, Y., Kou, Z., & Wu, L. (2024). Optimization of PID Control Parameters for Belt Conveyor Tension Based on Improved Seeker Optimization Algorithm. *Electronics*, 13(19), 3907. <https://doi.org/10.3390/electronics13193907>
7. PID Controller Closed Loop Conveyor // URL: <https://www.scribd.com/document/468805562/PID-Controller-Closed-Loop-Conveyor#> (date of publication: 04.01.2025).

УДК 620.93:662.769.2](045)

Гаврись Дмитро
магістрНаціональний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
<https://orcid.org/0009-0005-9367-0218> e-mail: dmitro.gavris@icloud.com**Бойченко Сергій**Професор Завідувач кафедри АЕМК
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”
<https://orcid.org/0000-0002-2489-4980> e-mail: boichenko.sergii@lil.kpi.ua

ВОДЕНЬ ЯК ОСНОВА СТАЛОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПЕРЕХОДУ: АНАЛІЗ КЛЮЧОВИХ ЕТАПІВ ВОДНЕВОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО ЦИКЛУ

Анотація

У контексті глобального енергетичного переходу водень виступає перспективним джерелом чистої енергії, здатним забезпечити декарбонізацію промисловості, транспорту та енергетики. Для розуміння його ролі в енергосистемі необхідно розуміти всі ключові етапи життєвого циклу водню — зокрема, виробництво, зберігання і транспортування. У статті розглядаються сучасні технології електролізу як основного методу отримання низьковуглецевого водню, із порівняльним аналізом електролізерів. Окрему увагу приділено компресійним технологіям, які забезпечують відповідну енергетичну щільність водню, в той же час суттєво впливають на його кінцеву вартість. Розглянуто переваги й недоліки сучасних методів зберігання водню — від стисненого та рідкого стану до хімічних носіїв і твердотільних форм. Проведений аналіз демонструє, що ефективність і масштабованість водневої економіки значною мірою залежать від удосконалення кожного з етапів водневого ланцюга — насамперед технологій виробництва та зберігання.

Ключові слова: *електроліз, виробництво водню, стиснення, електролізер, компресор*

Вступ

У зв'язку зі зростаючими викликами кліматичних змін та потребою в декарбонізації енергетичних систем, водень привертає дедалі більше уваги як універсальний енергетичний носій. Поштовхом до заміщення вуглецево-інтенсивних джерел енергії, таких як вугілля, нафта і природний газ, слугує не лише їхня обмеженість, а й істотний внесок у глобальні викиди CO₂ та кліматичні зміни [1]. У цьому контексті водень вважається однією з найбільш перспективних альтернатив через його здатність до чистого згоряння, що супроводжується утворенням лише води як побічного продукту [2]. Водночас ключем до широкого впровадження водню є розвиток ефективної та надійної технологічної бази для його виробництва, стиснення й зберігання.

Серед різноманітних методів отримання водню, електроліз води за допомогою електролізерів на основі відновлюваних джерел енергії вважається найбільш перспективним для досягнення кліматичних цілей. Проте різні типи електролізерів мають власні конструктивні особливості, переваги та обмеження, що обумовлює необхідність технічного аналізу їх ефективності й придатності до масштабного застосування. Не менш важливим є питання стиснення водню, оскільки його щільність у газоподібному стані є вкрай низькою, що ускладнює транспортування та зберігання.

Також актуальним залишається вибір оптимального способу зберігання водню — як у газоподібному, так і в рідкому стані, або з використанням твердотілих носіїв, що потребує порівняльного аналізу з огляду на показники безпеки, енергоефективності та економічної доцільності.

Комплексність технологічного процесу виробництва водню, зумовлює актуальність його подальших досліджень, оскільки саме ці чинники істотно впливають на перспективи масштабного впровадження водневих технологій у глобальну енергетичну систему.

Мета роботи і завдання дослідження

Мета роботи — комплексний аналіз основних технічних рішень, що лежать в основі сучасного водневого енергетичного циклу, включаючи процеси виробництва та стиснення водню.

Завдання роботи — комплексний аналіз сучасного стану водневої енергетики з акцентом на класифікацію, технології виробництва, стиснення та зберігання водню.

Об'єкт дослідження — технології виробництва та стиснення, водню як частина енергетичного переходу.

Предмет дослідження — водневий енергетичний цикл як частина сучасних технологій енергетичного переходу.

Гіпотезою цієї праці є: широкомасштабне впровадження водневої енергетики, зокрема

«зеленого» водню, може стати ключовим чинником у досягненні цілей декарбонізації, забезпеченні енергетичної безпеки та формуванні сталого енергетичного майбутнього за умови подолання технологічних, економічних та інфраструктурних бар'єрів.

Науково-прикладне завдання полягає у виявленні оптимальних технологічних та стратегічних підходів до розвитку водневої енергетики шляхом аналізу існуючих методів виробництва та стиснення водню.

Технологія електролізерів

Наразі поширеними типами установок для електролізу води, що використовуються для виробництва водню, є лужні водні електролізери (AWE), мембранні електролізери з полімерним електролітом (PEME) та електролізери з твердими оксидами (SOEs) [3]. Серед них AWE мають довшу історію розвитку та зрілі технології і домінують на ринку електролізерів, тоді як SOE мають вищу робочу температуру, менше енергоспоживання та вищу ефективність під час електролізу [4,5]. PEME швидко розвиваються в останні роки і використовують протоннообмінні мембрани замість діафрагм та електролітів у традиційних електролізерах. Три основні типи електролізерів та їхні характеристики наведено в таблиці 1

Таблиця 1

Основні параметри технологій електролізних осередків [6]

Параметри	AWE (лужний електролізер)	PEME (протонно- обмінна мембрана)	SOE (твердий оксидний електролізер)
Зрілість технології	Масова комерція лізація	Комерціалізація	Стадія дослід ження
Температура, °C	60–80	50–80	600–1000
Тиск, бар	10–30	20–50	1–15
Щільність струму, А/см ²	<0.45	1.0–2.0	0.3–1.0
Одинична електрична потужність, МВт	6	2	0.15

Продовження таблиці 1

Електрична ефективність, %	62–82	67–82	81–86
Споживання енергії системою, кВт·год/м³	4.2–4.8	4.4–5.0	2.5–3.5
Виробнича площа, м²	3–3.6	<0.13	<0.06
Швидкість виробництва водню, м³·год⁻¹	1400	400	<10
Термін служби реактора, тис. год	55–120	60–100	8–20
Термін служби системи, років	20–30	10–20	-
Чистота виробленого водню, %	>99.8	99.99	-
Час холодного старту, хв	60–120	5–10	>60
Час гарячого старту, с	60–300	<10	900
Інвестиційні витрати, дол./кВт	800–1500	400–2100	>2000

Таблиця 2

Порівняльна характеристика різних типів компресорів

Характеристика	Поршневий компресор	Поршневий діафрагмовий компресор	Відцентровий компресор	Поршнево-іонний компресор
Принцип роботи	Стиснення водню відбувається в циліндрі за рахунок поступального руху поршня.	Мембрана, що приводиться в рух поршнем, стискає водень, не допускаючи його контакту з мастилом.	Водень прискорюється обертовими лопатками, набуваючи кінетичної енергії, яка потім перетворюється в тиск.	Замість механічного поршня використовується рідкий поршень (іонна рідина), який стискає водень без твердих ущільнень.
Робочий тиск	До 300–1000 бар, залежно від конструкції.	До 1000 бар і вище.	До 200 бар.	До 900 бар і вище.
Коефіцієнт корисної дії (ККД)	Високий (~80–90%), залежно від кількості ступенів стиснення.	Дуже високий (~95%), оскільки відсутні втрати через контакт газу з мастилом.	Середній (~70–85%), особливо ефективний при великих потоках газу.	Високий (~90–95%), оскільки мінімізовані втрати на тертя та витоки.

Продовження таблиці 2

Герметичність	Можливі витіки водню через ущільнення поршня, що потребує спеціальних заходів безпеки.	Висока герметичність завдяки відсутності прямого контакту газу з рухомими деталями.	Відносно низька через складність забезпечення абсолютної герметичності при високих швидкостях.	Висока герметичність – рідкий поршень запобігає витікам.
Застосування	Водневі заправні станції, промислові установки, транспортні системи.	Виробництво та зберігання високочистого водню, водневі паливні заправки, хімічна промисловість.	Великі водневі виробництва, трубопровідний транспорт водню, компресія великих об'ємів газу.	Водневі заправні станції, зберігання та транспортування водню, компресорні станції високого тиску.
Чутливість до забруднень	Висока – водень може змішуватися з мастилом, що погіршує його чистоту.	Низька – водень не контактує з мастилом, що забезпечує його чистоту.	Висока – чутливий до наявності вологи та забруднень у газовому потоці.	Низька – іонна рідина не змішується з воднем, забезпечуючи чистоту газу.
Обслуговування	Високі вимоги до регулярного технічного обслуговування, зокрема заміни ущільнень і контролю витоків.	Мінімальні витрати на обслуговування, оскільки відсутній знос ущільнень від контакту з газом.	Складне технічне обслуговування, потребує точного балансування роторів.	Низькі витрати на обслуговування – відсутні традиційні механічні ущільнення.
Габарити та маса	Компактний, але може бути масивним при багатоступеневій конструкції.	Компактний, але складніший у конструкції, ніж класичний поршневий компресор.	Великі розміри та вага, особливо при високопродуктивних моделях.	Відносно компактний, але може вимагати спеціальних матеріалів для роботи з іонними рідинами.

Основні переваги	Високий тиск, відносно просте регулювання продуктивності.	Висока чистота водню, довговічність, мінімальні втрати через витоки.	Висока продуктивність, безперервна робота, ефективність при великих об'ємах водню.	Висока герметичність, довговічність, відсутність механічного зносу та мастильних матеріалів.
Основні недоліки	Можливі витоки, складність обслуговування через необхідність ущільнень, контакт газу з мастилом.	Висока вартість виготовлення, складність конструкції.	Висока вартість, складність забезпечення герметичності, низька ефективність при високих тисках.	Висока вартість іонних рідин, складність проектування та підтримання стабільності рідкого поршня.

Вибір типу електролізера залежить від конкретного застосування, джерел енергії, масштабів проекту та економічних чинників. Саме PEM-електролізери сьогодні найчастіше обираються для проектів, орієнтованих на гнучке виробництво зеленого водню в умовах змінного навантаження, типового для ВДЕ.

Технології стиснення Водню

Стиснення є найпоширенішим рішенням у ланцюгу постачання газоподібного H_2 , оскільки високий тиск дозволяє досягати прийнятної енергетичної щільності. Однак, незважаючи на широке використання, стиснення H_2 зазвичай вважається одним із найдорожчих технологічних процесів у водневому ланцюгу створення вартості [7,8].

Механічні компресори широко використовуються та працюють на основі прямого перетворення механічної енергії в енергію стисненого газу. Існує кілька класифікацій, але більшість компресорів, які сьогодні застосовуються для стиснення газоподібного H_2 , належать або до компресорів об'ємного витіснення, або до динамічних компресорів. Серед них особливе місце посідають поршневі компресори та його модифікації, а також відцентрові компресори, в таблиці 3 наведено порівняльна характеристика компресорів, що застосовуються.

Висновки

Дослідження ключових етапів водневого енергетичного циклу показало, що саме виробництво та стиснення водню становлять основу для формування ефективної та сталої водневої інфраструктури.

У сфері виробництва водню за допомогою електролізу спостерігається динамічний розвиток технологій, який підтримується національними та міжнародними ініціативами. Найбільш поширеними залишаються лужні (AEL), протонно-обмінні мембранні (PEM) та твердокислотні (SOEC) електролізери. Кожна технологія має свої переваги: AEL відзначаються зрілістю і економічністю, PEM — компактністю та високою динамічністю, а SOEC — високим теоретичним ККД при роботі у високотемпературному режимі. Провідні компанії світу активно працюють над масштабуванням потужностей електролізерів,

розробкою модульних рішень та підвищенням енергоефективності процесу електролізу.

Другим критично важливим етапом є стиснення водню, необхідне для його зберігання, транспортування або подачі до паливних елементів. У цьому контексті було розглянуто основні типи компресорів — поршневі та його модифікації і відцентрові. Поршневі компресори завдяки високій продуктивності, широкому діапазону тисків і гнучкості застосування є найбільш поширеними у галузі. Їхні безмасляні версії використовуються в ситуаціях, де критично важлива чистота водню, наприклад, для паливних елементів. Водночас, для великих потужностей і безперервної роботи дедалі активніше впроваджуються відцентрові компресори, які відзначаються високою ефективністю, низьким рівнем вібрацій і стабільністю при тривалих навантаженнях.

Таким чином, ефективне виробництво водню за допомогою електролізу та його подальше стиснення є взаємопов'язаними технологічними ланками, без яких неможливо забезпечити стале зберігання, транспортування та споживання водню. Подальше вдосконалення електролізерів і компресорного обладнання — це стратегічний напрям, що визначає успішність переходу до водневої енергетики на глобальному рівні.

Перелік використаних джерел

1. Qureshi F, et al. A State-of-The-Art Review on the Latest trends in Hydrogen production, storage, and transportation techniques. *Fuel* May 2023;340. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236123001874?via%3Dihub>
2. Chaube A, Chapman A, Shigetomi Y, Huff K, Stubbins J. The role of hydrogen in achieving long term Japanese energy system goals. *Energies* Sep. 2020;13(17): 4539. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/17/4539>
3. Nasser, M.; Megahed, T.F.; Ookawara, S.; Hassan, H. A review of water electrolysis-based systems for hydrogen production using hybrid/solar/wind energy systems. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2022, 29, 8699487018. URL: https://www.researchgate.net/publication/364694263_A_review_of_water_electrolysis-based_systems_for_hydrogen_production_using_hybrid_solar_wind_energy_systems
4. Gutiérrez-Martín, F.; Amodio, L.; Pagano, M. Hydrogen production by water electrolysis and off-grid solar PV. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 29038–29048. URL: https://www.researchgate.net/publication/346167917_Hydrogen_production_by_water_electrolysis_and_off-grid_solar_PV
5. Nemiwal, M.; Zhang, T.C.; Kumar, D. Graphene-based electrocatalysts: Hydrogen evolution reactions and overall water splitting. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 21401–21418. URL: https://www.researchgate.net/publication/351166665_Graphene-based_electrocatalysts_Hydrogen_evolution_reactions_and_overall_water_splitting
6. Nnabuike SG, et al. The prospects of hydrogen in achieving net zero emissions by 2050: a critical review. *Sustainable Chemistry for Climate Action* 2023;2(Jan). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772826923000135?via%3Dihub>
7. Hydrogen Energy in Electrical Power Systems: A Review and Future Outlook Siting Dai, Pin Shen, Wenyang Deng and Qing Yu URL: https://www.researchgate.net/publication/383444047_Hydrogen_Energy_in_Electrical_Power_Systems_A_Review_and_Future_Outlook
8. G. Parks, Hydrogen Station Compression, Storage, and Dispensing Technical Status and Costs. National Renewable Energy Laboratory, 2014.

СЕКЦІЯ 3.
ГЕОІНЖЕНЕРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ЕКОЛОГІЯ ТА
РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ

УДК 504.53.062

I. Piskun, Assistant
D. Zalivan, Student
Ya. Naumov, Assistant
State University "Zhytomyr Polytechnic"

ASSESSMENT OF THE FEASIBILITY OF BIOCHAR APPLICATION FOR RESTORING SOIL FERTILITY IN AREAS AFFECTED BY TITANIUM ORE EXTRACTION

The article substantiates the effectiveness of biochar as a phytoremediation additive for the reclamation of soils degraded by hydromechanized ilmenite mining at the Valky-Hatskivske deposit. An integrated assessment of the tailings revealed critical acidity levels (pH 4.5–5.0), low humus content, and potential accumulation of heavy metals, all of which significantly hinder fertility restoration. A 42-day laboratory experiment examined the effect of 5%, 10%, and 15% (w/w) biochar doses, as well as a combined additive of 5% biochar + 5% peat, on changes in pH of the degraded sandy substrates; monitoring was conducted every 14 days.

It was found that the application of 15% biochar increased the pH by an average of 1.5 units, shifting the substrate into a slightly acidic to neutral range. Meanwhile, the combined additive achieved a comparable effect with three times less biochar due to humus activation.

The results confirm the high buffering and sorption capacity of carbonized biomass and its synergy with organic components. Technological guidelines for application (15% or 5% + 5%) are proposed, which ensure rapid neutralization of acidity and create favorable conditions for primary plant succession.

Keywords: *biochar, reclamation, ilmenite, degraded soils, pH neutralization.*

Introduction. Ilmenite extraction in Ukraine is predominantly conducted through open-pit mining, which results in significant disruption of natural landscapes, reduction of fertile land areas, soil erosion, and disturbance of the hydrological balance. As a consequence of these anthropogenic impacts, there is an urgent need for comprehensive land reclamation aimed at restoring ecosystems and returning the land to a condition suitable primarily for agricultural use — a priority that holds particular relevance for Ukraine.

Analysis of the soil condition in areas reclaimed after ilmenite mining reveals their predominantly sandy or sandy loam texture, characterized by low water retention capacity and limited nutrient content. In light of this, the application of fertilizers and agrotechnical measures becomes a critical factor in accelerating the restoration of soil productivity and enhancing its economic value. The search for and implementation of new, more effective reclamation methods is of paramount importance for ensuring the sustainable development of the mining sector and preserving natural resources for future generations. This issue gains particular urgency under current conditions, as the ongoing armed conflict has already led to the loss of a significant portion of the country's agricultural land [1].

Aim and Objectives. The aim of this study is to provide a comprehensive justification of the effectiveness of biochar as a phytoremediation additive for restoring the agrochemical properties of soils disturbed by hydromechanized ilmenite mining.

The main objectives of the study are to characterize the mineral and agrochemical condition of degraded soils in ilmenite tailings; to determine the physicochemical parameters of biochar relevant to soil remediation; to develop and carry out an experiment involving the application of biochar in various doses and combinations with subsequent monitoring of pH and related indicators; to compare the dynamics of acidity neutralization and fertility improvement under different treatment options; and to formulate scientifically grounded recommendations regarding the optimal dose and method of biochar application for the reclamation of ilmenite deposits.

Materials and Research Results The tailings of mining enterprises engaged in the development of ilmenite deposits are formed primarily from waste generated during ore extraction and beneficiation. The chemical composition of these tailings largely depends on the mineralogical characteristics of the specific deposit and the technological processes applied. Typically, the main components include oxides of silicon (SiO_2), aluminum (Al_2O_3), iron (Fe_2O_3 and FeO), titanium (TiO_2), and other compounds in smaller quantities [2].

For example, the Valky-Hatskivske placer ilmenite deposit, selected as the object of this study, is composed primarily of alluvial and eluvial sediments consisting of variably grained sands, loams, sandy loams, and secondary kaolins. The main ore mineral in these deposits is ilmenite, with grain sizes ranging from 0.1 to 2–3 mm. The ilmenite content in the placers can vary from 15–20 to 200–400 kg/m³, with an average value of 60–80 kg/m³. At the same time, factors such as weathering, hydrological conditions, and the degree of leaching must be taken into account, as they can lead to significant variations in the chemical composition of the tailings. Therefore, detailed analytical investigations are recommended in each specific case.

Given the described mineral characteristics and the potential presence of heavy metals in such tailings, the issue arises of finding effective methods to improve their physicochemical properties and reduce their toxic impact on plants and the environment. In this context, the application of biochar may play a potentially significant role as a promising material for the reclamation and restoration of fertility in degraded soils [3].

Biochar (biocarbon) is a porous material produced by the pyrolysis of organic residues (such as wood, agricultural waste, or other biomass) [4].

Among the important effects of biochar, particular attention should be paid to its influence on the acid-base balance, as it most often increases or stabilizes the pH level — a critical factor for acidic tailings with a high sulfide content, which can form sulfuric acid upon oxidation. Given that in tailings ponds resulting from hydromechanized ilmenite extraction, the pH often shifts into the acidic range (down to values below 5), the application of biochar contributes to its gradual neutralization [5].

Hypothetically, the application of biochar alone will already have a positive effect, but its effectiveness increases significantly when biological processes in the soil are properly activated.

The effective application rate of biochar depends on the type of soil to which it is applied. For contaminated soils (containing metal oxides or heavy metals), the recommended biochar addition is 5–15% by weight, depending on the level of contamination. In the case of sandy or low-fertility soils, the recommended rate is 5–8% by weight, which improves water and nutrient retention. For light-textured soils (with poor structure), an application of 3–5% by weight is sufficient to enhance soil structure and reduce compaction [6, 7].

The impact of biochar on soil quality increases over time. Initially, a short-term effect (1–6 months) is observed, during which water and nutrient retention improves, soil acidity is neutralized, and the bioavailability of toxic metals decreases. The medium-term effect (6–12 months) is characterized by increased microbial activity, improved soil structure, and enhanced fertility. The long-term effect (1–5 years or more) ensures sustained reduction in soil toxicity, increased fertility due to the accumulation of organic matter, and prolonged retention of nutrients and moisture [8].

To confirm the feasibility of using biochar for the restoration of areas disturbed by mining activities, an empirical study was conducted to provide a basis for predicting the effectiveness of the proposed solutions under the conditions of ilmenite deposit reclamation. During the study, four soil samples weighing 2 kg each were collected from ilmenite mining sites reclaimed using a water management method (Fig. 1).

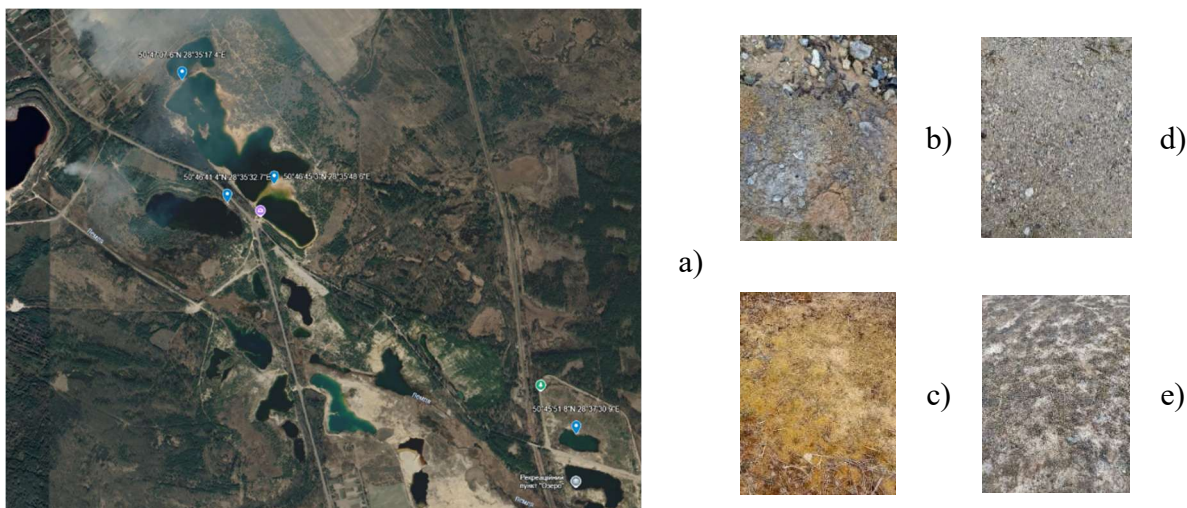


Fig.1. General overview of the study area (a) and examples of soils collected as sample 1 (b), sample 2 (c), sample 3 (d), and sample 4 (e)

Each primary soil sample was quartered, resulting in four laboratory sub-samples weighing 0.5 kg each. Biochar was added to three of them in doses of 5%, 10%, and 15% by weight. The fourth sample, considering the potential synergistic effect of organic components, was enriched with a composite additive containing 5% biochar and 5% raised peat, which is chemically and physically similar to biochar and capable of enhancing the sorption and buffering properties of the mixture.

After thoroughly mixing the additives with the substrate, the initial acidity (pH) of each sample was determined, and further monitoring of this parameter was carried out at 14-day intervals over a period of 42 days.

In this way, initial data were collected, allowing for a quantitative assessment of the rate and amplitude of acidity neutralization under the influence of different doses of biochar and its combination with peat (Table 1).

Table 1
Dynamics of Soil Acidity Changes with the Addition of Varying Amounts of Biochar and Peat
(Using the Valky-Hatskivske Ilmenite Deposit as a Case Study)

Time Interval of Measurements	Sample No.	pH Measurements by Sample			
		Sample (biochar 5%)	Sample 2 (biochar 10%)	Sample 3 (biochar 15%)	Sample 4 (biochar 5%, peat 5%)
Day 0	1	5,0	5,0	5,0	5,0
	2	4,8	4,8	4,8	4,8
	3	5,7	5,7	5,7	5,7
	4	4,5	4,5	4,5	4,5
Day 14	1	5,0	5,0	5,0	5,0
	2	4,8	4,8	4,9	4,8
	3	5,7	5,7	5,7	5,7
	4	4,5	4,5	4,5	4,5
Day 28	1	5,1	5,1	5,2	5,1
	2	5,0	5,0	5,1	5,1
	3	5,8	5,8	6,0	5,9
	4	4,5	4,6	4,8	4,8
Day 42	1	5,1	5,1	5,2	5,2
	2	5,0	5,0	5,1	5,2
	3	5,8	5,8	6,0	6,0
	4	4,5	4,6	4,8	5,0

The pH time curves for the four sampling locations (Fig. 2) show a consistent trend of

increasing pH values, with a steady upward trajectory. The greatest effect is observed with the application of 15% biochar, resulting in an average pH increase of approximately 0.3 units. A 10% dose provides slightly less neutralization ($\approx +1.5$ units), as does the 5% biochar dose (with the exception of sample 4).

The combined additive “5% biochar + 5% peat” also shows a pH increase comparable to the application of 15% biochar, exceeding it at certain time intervals. This indicates a synergistic effect, where peat enriched with humic acids enhances the cation exchange capacity and contributes to additional buffering, allowing for a reduction in biochar usage without compromising effectiveness.

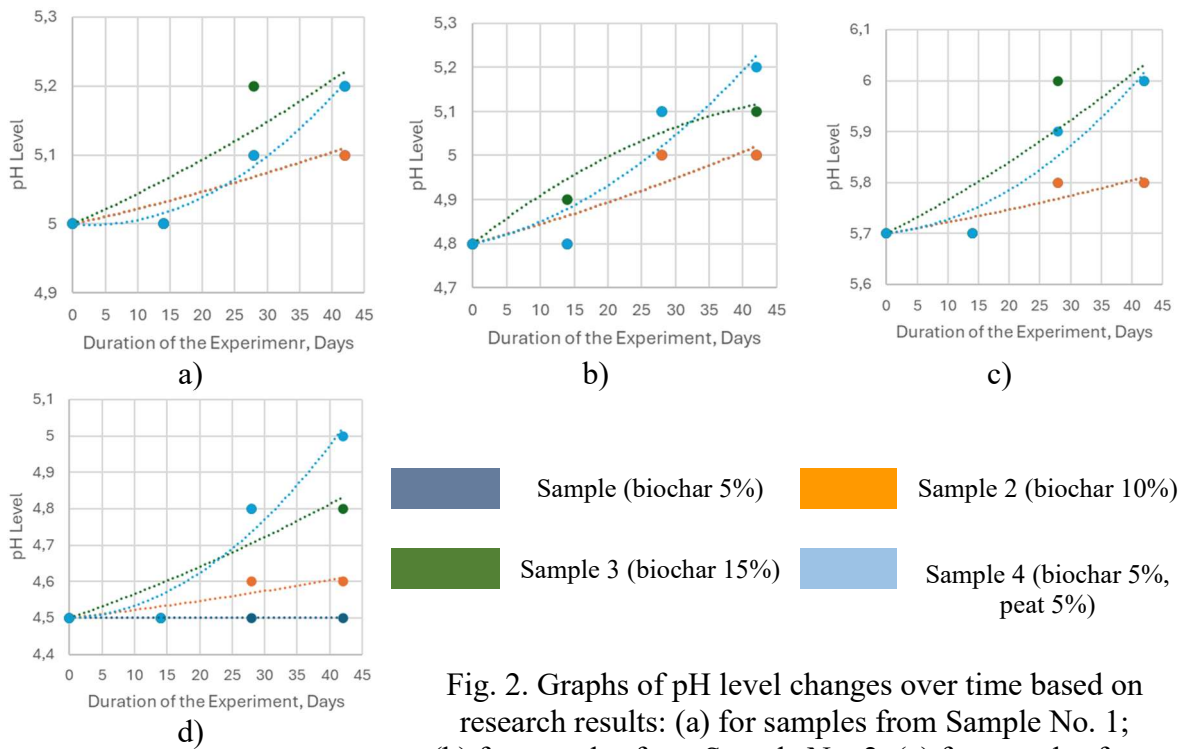


Fig. 2. Graphs of pH level changes over time based on research results: (a) for samples from Sample No. 1; (b) for samples from Sample No. 2; (c) for samples from Sample No. 3; (d) for samples from Sample No. 4

Conclusions. The conducted study was aimed at improving methods of agricultural reclamation of waste dumps and tailings formed as a result of ilmenite mining operations. The experiment demonstrated that the application of biochar significantly improves the agrochemical condition of degraded substrates, as an increase in pH was observed as early as the fourth week after application. The greatest neutralization of acidity occurred in the variants with 15% biochar and with the combined additive of 5% biochar + 5% peat. In the first case, the pH shifted toward neutral values, indicating the high buffering capacity of carbonized biomass, while in the second, the noticeable pH increase can be attributed to humus enrichment from the peat, which potentially enhances soil fertility.

Therefore, the results of the study confirm the feasibility of using biochar as an additive for the reclamation of ilmenite mining tailings. From the standpoint of both effectiveness and economic viability, the optimal approach is the application of 15% biochar or its combination with peat in a 5% + 5% ratio, which not only neutralizes soil acidity but also creates favorable conditions for the growth of pioneer plant species. Further scaling of this technology, complemented by the planting of unpretentious leguminous crops (particularly lupine), can accelerate the formation of a humus horizon, improve the water regime, and support the sustainable restoration of fertility in disturbed lands. The implementation of such approaches aligns with the strategy of sustainable development and ecological rehabilitation of industrial landscapes in Ukraine.

References

1. Ivanov Ye., Bilaniuk V. (2017) Problems of reclamation and revitalization of lands disturbed by mining operations. Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Conference "Subsoil Use in Ukraine. Investment Prospects", Truskavets, Ukraine, November 6–10, pp. 262–270.
2. Smirnov A. and others (2016) Mineralogical features and conditions of formation of ilmenite ores of the Valky-Hatskivske deposit. Bulletin of Lviv University. Geological Series. Issue 30. P. 63–69.
3. Kriuchenko N. and others (2015) Ecological and geochemical assessment of surface deposits in the territory of the Irshansk ilmenite deposit. Scientific Journal «ScienceRise». Issue 3, No. 1(8). P. 25–28. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.38728>.
4. Zalivan D., Piskun I. (2024) Multidisciplinary approach to reclamation of areas disturbed by mining workings on the example of ilmenite quarries. Abstracts of the II All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Mining and Construction", Zhytomyr, Zhytomyrska Politekhnik, pp. 30–31.
5. Ramirez-Zamora J. and others (2022) Assisted Phytostabilization of Mine-Tailings with *Prosopis laevigata* (Fabaceae) and Biochar. Plants. Vol. 11. P. 3441. URL: <https://doi.org/10.3390/plants11243441>.
6. Shomko O. (2024) Investigation of physico-chemical and agrochemical properties of soils in reclaimed territories disturbed by ilmenite mining. Scientific Progress & Innovations. Issue 27 (1). P. 74–81. URL: <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.01.13>.
7. Simiele M. and others (2019) Assisted phytoremediation of a former mine soil using biochar and iron sulphate: Effects on As soil immobilization and accumulation in three Salicaceae species. The Science of the total environment. Vol. 710. P. 136203. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136203>.
8. Fellet G. and others (2011) Application of biochar on mine tailings: effects and perspectives for land reclamation. Chemosphere. Vol. 83, Iss. 9. P. 1262–7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.053>.

І.А. Піскун, асистент

Д.І. Заліван, студент

Я.О. Наумов, асистент

Державний університет «Житомирська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОЦІЛЬНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ БІОЧАРУ ЯК ЗАСОБУ ВІДНОВЛЕННЯ РОДЮЧОСТІ ҐРУНТІВ, ПОРУШЕНИХ ВИДОБУТКОМ ТИТАНОВОЇ СИРОВИНИ

У статті обґрунтовано ефективність біоچارу як фіторе mediaційної добавки для рекультивациі ґрунтів, деградованих гідромеханізованим видобутком ільменіту на Валки-Гацьківському родовищі. Інтегральна оцінка відвалів засвідчила критичну кислотність (pH 4,5–5,0), низьку гумусованість та потенційне накопичення важких металів, що істотно обмежує відновлення родючості. У 42-добовому лабораторному експерименті вивчено вплив доз 5, 10 і 15 % біоچارу (мас.) і комбінованої добавки 5 % біоچارу + 5 % торфу на зміну pH деградованих піщаних субстратів; контроль проводили кожні 14 діб.

Встановлено, що внесення 15 % біоچارу підвищує рН у середньому на 1,5 од., переводячи субстрат у слабкокислий-нейтральний діапазон, тоді як комбінована добавка забезпечує аналогічний ефект при утриманні менших витратах біоچارу за рахунок гумусової активації.

Результати підтверджують високу буферну та сорбційну ємність карбонізованої

біомаси і її синергізм з органічними компонентами. Запропоновано технологічні регламенти застосування (15 % або 5 % + 5 %), що забезпечують швидку нейтралізацію кислотності та створюють сприятливі умови для первинної рослинної сукцесії.

Ключові слова: біочар, рекультивація, ільменіт, деградовані ґрунти, рН-нейтралізація.

Список використаних джерел:

1. Іванов Є. А., Біланюк В. І. Проблеми рекультивації і ревіталізації земель, порушених гірничими роботами. Матеріали четвертої міжнародної науково-практичної конференції "Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування", Трускавець, Україна, 6–10 листопада. 2017. С. 262–270
2. Смірнов А., Богданова М., Венглівська В. Мінералогічні особливості та умови формування ільменітових руд Валки-Гацьківського родовища. Вісник Львівського університету. Серія геологічна. 2016. Вип. 30. С. 63-69.
3. Крюченко Н.О., Язвинська М.В., Жовинський Е.Я. Еколого-геохімічна оцінка поверхневих відкладів території Іршанського родовища ільменіту. Scientific Journal «ScienceRise». 2015. Вип. 3, № 1(8). С. 25-28. URL: <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2015.38728>
4. Заліван Д.І., Піскун І.А. Мультидисциплінарний підхід до рекультивації порушених гірничими виробками площ на прикладі ільменітових кар'єрів. Тези ІІ Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гірництва та будівництва». Житомир: «Житомирська політехніка», 2024. С. 30-31.
5. Ramirez-Zamora J., Mussali-Galante P., Rodriguez A., Castrejon-Godinez M., Valencia-Cuevas L., Tovar-Sanchez E. Assisted Phytostabilization of Mine-Tailings with *Prosopis laevigata* (Fabaceae) and Biochar. Plants. 2022. Vol. 11. P. 3441. URL: <https://doi.org/10.3390/plants11243441>
6. Шомко О. М. Дослідження фізико-хімічних та агрохімічних властивостей ґрунту рекультивованих територій порушених видобутком ільменіту. Scientific Progress & Innovations. 2024. Вип. 27 (1). С. 74–81. URL: <https://doi.org/10.31210/spi2024.27.01.13>
7. Simiele M., Lebrun M., Miard F., Trupiano D., Poupart P., Forestier O., Scippa G., Bourgerie S., Morabito D. Assisted phytoremediation of a former mine soil using biochar and iron sulphate: Effects on As soil immobilization and accumulation in three Salicaceae species. The Science of the total environment. 2019. Vol. 710. P. 136203. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136203>.
8. Fellet G., Marchiol L., Vedove G., & Peressotti A. Application of biochar on mine tailings: effects and perspectives for land reclamation. Chemosphere, 2011. Vol. 83, Iss. 9. P. 1262-7. URL: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.03.053>

Андрій ПЕТЕЛЬКА, аспірант,
Людмила СКЛЯР, канд. техн. наук, доцент
Криворізький національний університет
вул. Віталія Матусевича, 11, 50027 м. Кривий Ріг, Україна
e-mail: andrey.petelka@knu.edu.ua

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ЗНЕВОДНЕННЯ ТОНКО ПОДРІБНЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОНЦЕНТРАТІВ

Анотація

Дослідження присвячено підвищенню енергоефективності зневоднення тонко подрібнених залізорудних концентратів для виробництва сировини, придатної для технології прямого відновлення заліза (DRI). Метою є порівняння енергоефективності тканинних вакуум-фільтрів ДУ-100-2,5 та керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90, а також визначення оптимальних параметрів роботи останніх для забезпечення масової частки вологи концентрату в межах 9,0 – 9,5% при мінімальних енергетичних витратах. Експерименти, проведені на ПРАТ «ЦГЗК», показали, що керамічні фільтри забезпечують продуктивність 0,7 – 0,9 т/м² і знижують енергоспоживання завдяки капілярній дії мікропор та ефективній регенерації. Наукова новизна полягає у розробці математичної моделі прогнозування залишкової вологи із середньою точністю 0,17% та величиною збіжності 0,9787. Практична значимість полягає у можливості впровадження енергоефективної технології на вітчизняних підприємствах для підвищення конкурентоспроможності на ринках концентратів.

Ключові слова: енергоефективність, зневоднення, залізорудний концентрат, керамічні вакуум-фільтри, DRI обкотиші, вакуум-фільтрація.

Виробництво високоякісних залізорудних концентратів для технології прямого відновлення заліза (DRI) є важливим завданням для гірничо-збагачувальних підприємств. Зростання вимог до якості сировини, зокрема вмісту заліза (70,0–70,5%) та стабільної залишкової вологи (9,0–9,8%), зумовлює необхідність удосконалення технологій зневоднення. Зневоднення тонко подрібнених концентратів (98–99% класу -0,056 мм) є енергоємним процесом, що суттєво впливає на собівартість продукції. Традиційні тканинні вакуум-фільтри, такі як ДУ-100-2,5, мають високу енергоємність через проникнення повітря крізь фільтрувальну тканину, часте забруднення та потребу регулярної заміни фільтрувальних матеріалів. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90, які використовують капілярну дію мікропор, пропонують енергоефективну альтернативу завдяки стабільності процесу, довговічності та зниженню енергоспоживання. Метою дослідження є аналіз енергоефективності керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 порівняно з тканинними фільтрами ДУ-100-2,5, визначення ключових параметрів, що впливають на енергоспоживання, та розробка рекомендацій для їх оптимізації. Дослідження проводилися на ПРАТ «ЦГЗК» з акцентом на досягнення стабільної залишкової вологи концентрату, придатної для виробництва DRI обкотишів.

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями.

Тонке подрібнення залізорудних концентратів для підвищення вмісту заліза призводить до збільшення питомої поверхні частинок, що ускладнює їх зневоднення. Тканинні вакуум-фільтри ДУ-100-2,5, які широко застосовуються на вітчизняних підприємствах, мають низку недоліків: низька ефективність при обробці тонких класів (-0,056 мм), нестабільна залишкова вологість (вище 9,8%) та високе енергоспоживання через проникнення повітря крізь тканину. Це призводить до додаткових витрат енергії на сушку та ускладнює виробництво сировини для DRI обкотишів, які вимагають чітко контрольованої

вологи для забезпечення міцності та зношуваності сирих та обпалених залізородних обкотишів. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90, завдяки мікропористій структурі пластин, забезпечують ефективне зневоднення за рахунок капілярної дії, що усуває проникнення повітря та знижує енергоспоживання. Дослідження [1] показують, що керамічна фільтрація може зменшити енергетичні витрати на 20–30% порівняно з тканинними фільтрами. Крім того, керамічні фільтри мають вищу довговічність і потребують менше обслуговування, що додатково сприяє економії ресурсів. Основним завданням дослідження є визначення оптимальних параметрів роботи КДФ-90 для мінімізації енергоспоживання при збереженні необхідної якості концентрату.

Методи дослідження

Експериментальні дослідження проводилися на ПРАТ «ЦГЗК» з використанням тонко подрібненого залізородного концентрату (98–99% класу -0,056 мм, вміст заліза 70,0–70,5%). Порівнювалися два типи обладнання: тканинні вакуум-фільтри ДУ-100-2,5 та керамічні вакуум-фільтри КДФ-90. Основні параметри, що аналізувалися:

- масова частка заліза загального у концентраті;
- масова частка класу -0,056 мм;
- питома поверхня концентрату;
- вакуум у зонах набору та сушки;
- швидкість обертання дисків;
- питома продуктивність.

Для аналізу впливу параметрів на залишкову вологу та енергоспоживання використовувався лінійний аналіз засобами Microsoft Excel. Енергоспоживання оцінювалося через вимірювання потужності вакуумних насосів та частоти їх роботи. Дані порівнювалися з літературними джерелами [1, 2] для підтвердження енергоефективності керамічних фільтрів.

Результати та їх аналіз

Експерименти показали, що керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 забезпечують стабільну продуктивність 0,7 – 0,9 т/м² і залишкову вологу концентрату в межах 9,0 – 9,8%, що відповідає вимогам для виробництва DRI обкотишів. Тканинні фільтри ДУ-100-2,5, навпаки, мали нестабільну вологість (9,8 – 10,9%) і вищі енергетичні витрати через проникнення повітря крізь тканину. Керамічні фільтри знижують енергоспоживання на 15 – 25% завдяки капілярній дії мікропор, яка усуває потребу в додатковому тиску для фільтрації.

Було проведено серію випробувань на керамічних вакуум-фільтрах КДФ-90 з метою прогнозування залишкової вологи концентрату та підвищенню енергоефективності роботи обладнання. Результати випробувань керамічного вакуум-фільтра КДФ-90 наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Результати випробувань керамічного вакуум-фільтра КДФ-90.

Fe заг.	кл. - 0,056 мм	Величина вакууму		Швидкість обертання дисків	Питома продуктивність	Питома поверхня концентрату	Залишкова волога концентрату	Розрахункова волога	Δ
		зона набору	зона сушки						
β _{заг}	β _{-0,056}	P _{наб.}	P _{суш.}	n	q	SSA	W	W _p	
%	%	бар	бар	об/хв	т/м ²	см ² /г	%	%	
69,41	98,2	0,78	0,85	0,82	0,9980	1870	9,27	9,655	0,385
69,41	98,1	0,77	0,86	0,82	0,9553	2018	10,03	9,662	0,368
69,61	94,2	0,47	0,86	0,83	0,8900	1860	9,50	9,481	0,019
70,40	98,6	0,85	0,74	0,82	1,0870	1959	10,00	9,885	0,115
69,80	95,2	0,85	0,86	0,7	0,8205	1971	9,23	9,32	0,09
69,90	96,6	0,77	0,88	0,77	0,6413	2192	9,43	9,3	0,13
70,31	98	0,77	0,87	0,79	1,1335	2011	9,75	9,84	0,09
70,38	97,8	0,77	0,88	0,85	0,8424	2178	9,66	9,653	0,007
70,87	98,4	0,73	0,86	0,88	0,5053	2082	9,30	9,3	0

Fe заг.	кл. - 0,056 мм	Величина вакууму		Швидкість обертання дисків	Питома продуктивність	Питома поверхня концентрату	Залишкова волога концентрату	Розрахункова волога	Δ
		зона набору	зона сушки						
β _{заг}	β _{-0,056}	P _{наб.}	P _{суш.}	n	q	SSA	W	W _p	
%	%	бар	бар	об/хв	т/м ²	см ² /г	%	%	
70,10	98	0,89	0,87	0,86	0,4806	2083	9,06	9,22	0,16
70,48	99	0,82	0,87	0,88	0,5364	2008	9,08	9,3	0,22
70,59	97,6	0,83	0,87	0,84	0,5170	2054	9,28	9,23	0,05
70,38	98	0,73	0,84	0,73	0,4824	2229	9,10	9,154	0,054
70,97	97,1	0,88	0,71	0,6	1,2335	2119	9,20	9,869	0,669
70,69	99,4	0,89	0,63	0,8	0,9277	2165	9,83	9,855	0,025
70,78	99,2	0,82	0,8	0,83	1,0608	2133	9,93	9,925	0,005
70,68	99,2	0,69	0,81	0,8	0,9410	2101	9,13	9,742	0,612
70,59	98,6	0,89	0,46	0,7	0,9261	1889	9,70	9,699	0,001
70,68	99,1	0,88	0,77	0,7	0,7965	2229	9,60	9,539	0,061
70,98	99,6	0,72	0,85	0,55	0,9045	2006	9,70	9,361	0,339
Середнє відхилення									0,170
Стандартне відхилення									0,202
Збіжність									0,9787

За допомогою інструментів аналізу Microsoft Excel отримано коефіцієнти впливу показників роботи вакуум-фільтра для лінійної залежності прогнозованого рівня залишкової вологи концентрату:

$$W_p = 2,71377 \times Fe_{\text{заг}} + 1,65862 \times \beta_{-0,056} + 1,16268 \times n + 1,11527 \times q + 0,41852 \times SSA + 0,00022 \times P_{\text{наб.}} - 0,54507 \times P_{\text{суш.}} + 3,75866;$$

де, Fe_{заг} – масова частка заліза загального у концентраті (%);

β_{-0,056} – масова частка класу -0,056 мм (%);

SSA – питома поверхня концентрату (тис. см² / г);

P_{наб.}, P_{суш.} – вакуум у зонах набору та сушки (бар);

n – швидкість обертання дисків (хв⁻¹);

q – питома продуктивність (т/м²·год).

Середнє відхилення розрахункової вологи від фактичної становить 0,17%, величина стандартного відхилення – 0,202%, величина збіжності – 0,9787, що свідчить про високу точність залежності. Графік збіжності розрахункової та фактичної залишкової вологи наведено на Рис. 1.

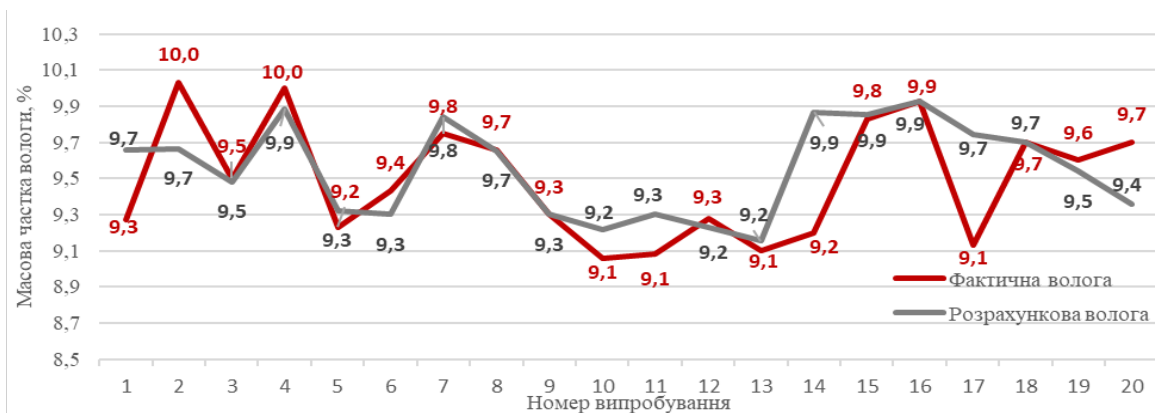


Рис. 1. Графік збіжності розрахункової та фактичної залишкової вологи.

Аналіз енергоспоживання показав, що тканинні фільтри витрачають 1,2 - 1,5 кВт·год/т

концентрату через необхідність підтримання високого вакууму та часту заміну тканин. Керамічні фільтри знижують ці витрати до 0,9 – 1,1 кВт·год/т завдяки стабільній роботі вакуумних насосів і довговічності пластин. Дослідження [3] підтверджують, що керамічна фільтрація забезпечує економію енергії до 30% при обробці залізорудних концентратів.

Обговорення

Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 мають значні переваги порівняно з тканинними фільтрами ДУ-100-2,5. По-перше, капілярна дія мікропор усуває проникнення повітря, що знижує навантаження на вакуумні насоси. По-друге, довговічність керамічних пластин (до 5 років порівняно з 3 – 6 місяцями для тканин) зменшує витрати на обслуговування. По-третє, ефективна регенерація за допомогою ультразвуку та азотної кислоти підтримує стабільну продуктивність без додаткових енерговитрат.

Літературні джерела [1, 3] підкреслюють, що енергоефективність керамічної фільтрації залежить від правильного вибору параметрів, таких як густина пульпи, рН суспензії та температура. Наприклад, нейтральний рН (7,0) і температура 36°C сприяють зниженню в'язкості пульпи, що додатково зменшує енергоспоживання. Додавання флокулянтів може підвищити ефективність при низькому вмісті твердих частинок, але їх використання потребує додаткових досліджень для тонких концентратів.

Висновки

1. Керамічні вакуум-фільтри КДФ-90 є енергоефективною альтернативою тканинним фільтрам ДУ-100-2,5, забезпечуючи продуктивність 0,7 – 0,9 т/м² і залишкову вологу 9,0 – 9,8% при зниженні енергоспоживання на 15–25%.

2. Для дотримання оптимальних параметрів роботи КДФ-90 необхідно контролювати на коригувати такі параметри роботи як: масова частка заліза загального у концентраті, масова частка класу -0,056 мм, питома поверхня концентрату, вакуум у зонах набору та сушки, швидкість обертання дисків, питома продуктивність. Також регулярно необхідно проводити регенерацію фільтрувальних поверхонь за допомогою ультразвуку та азотної кислоти.

3. Розроблена математична залежність прогнозування залишкової вологи має високу точність (середнє відхилення 0,17%; стандартне відхилення 0,202%, величина збіжності 0,9787) і може бути використана для оптимізації процесу зневоднення.

4. Подальші дослідження мають бути спрямовані на аналіз впливу рН суспензії, температури, застосування флокулянтів і коагулянтів, а також на розробку методів зниження витрат при регенерації фільтрувальних пластин.

Посилання:

1. Smith, J. Optimal ceramic filtration operating conditions for an iron-ore concentrate / J. Smith – Minerals Engineering, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.10.011>
2. Salmimies, R. The scaling and regeneration of the ceramic filter medium used in the dewatering of a magnetite concentrate / R. Salmimies. – International Journal of Mineral Processing, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2012.12.006>
3. Adail, M. Influence of process variables on the ceramic capillary filtration of iron ore slurries / M. Adail – Minerals Engineering, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107562>.

УДК 622.23.05

Нестеренко Анатолій Володимирович,
студент

Сліденко Віктор Михайлович,
д.т.н., проф.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»
м. Київ, Україна

Тесленко Олександр Іванович,
к.т.н., ст. дослідник

Інститут загальної енергетики
Національної академії наук України
м. Київ, Україна

П'ЄЗОКАВІТАЦІЙНА ХВИЛЬОВА ТЕХНОЛОГІЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУТКУ ВУГЛЕВОДНІВ

Анотація. У статті представлена характеристика технологій впливу на привибійну зону нафтової свердловини з актуалізацією п'єзокавітаційної хвильової технології та наведена імітаційна модель для розрахунку дії кавітаційного потоку робочої рідини на обсадну колону за допомогою оболонки SolidWorks з встановленням частоти коливань, тиску та швидкості затопленого струменя рідини на виході з генератора, а також рекомендовані ефективні п'єзокерамічні матеріали.

Ключові слова: п'єзоефект, кавітація, технологія, імітаційна модель, частота коливань, п'єзокераміка.

Продуктивність нафтової свердловини безпосередньо пов'язана з погіршенням фільтраційних властивостей привибійної зони.

У видобувних свердловинах основними причинами зниження проникності привибійної зони пласта (ПЗП) є: часткова або повна кольматація порового простору твердою фазою глинистого розчину при бурінні та перфорації; глибоке проникнення фільтрату глинистого розчину в пласт у процесі розкриття його бурінням та збільшення вмісту води у привибійній зоні; глибоке проникнення прісної або мінералізованої води в пласт при глушенні та промиванні свердловин у період їх експлуатації, а також при зупинці свердловин з обводненими інтервалами пласта, за рахунок чого збільшується вміст води в ПЗП та відбувається зниження фазової проникності нафтою; кольматація ПЗП механічними домішками та продуктами корозії свердловинного обладнання, що утворюються при глушенні чи промиванні свердловин під час ремонтних робіт [1, с. 65].

Для інтенсифікації видобутку вуглеводнів проводиться обробка привибійної зони свердловини в періоди проведення поточних та капітальних ремонтів. На ефективність обробки привибійної зони свердловин впливають дві основні групи факторів:

1. Геолого-фізичні (середня товщина та число продуктивних прошарків, число глинистих прошарків, середньозважені коефіцієнти проникності та пористості, глибина залягання продуктивного пласта, дисперсія проникності прошарків по розрізу, частка найбільш продуктивного прошарку у загальній продуктивності свердловин та ін.)

2. Промислово-технологічні (дебіти нафти та рідини, ступінь зниження продуктивності, середньозважена поточна нафтонасиченість прошарків, динаміка змін дебітів нафти та обводненості, середній ступінь взаємодії свердловини з оточуючими та ін.)

На рис.1 наведена схема, яка відображає різноманітні способи впливу на привибійну зону свердловини з метою підвищення продуктивності вуглеводнів. Одним із способів, які пропонуються, є комбінований спосіб, що пов'язаний з гідродинамічною кавітацією та п'єзоефектом. Так генерація електромагнітного поля дозволяє притягати або відштовхувати частинки речовини, які заряджені електрикою різного або однакового знака (відповідно), що впливає на звуження потоку з концентрацією енергії кавітаційного потоку в центральній частині і що призводить до видовження кавітаційного факелу при значному підвищенні потужності кавітації [2, с.45].

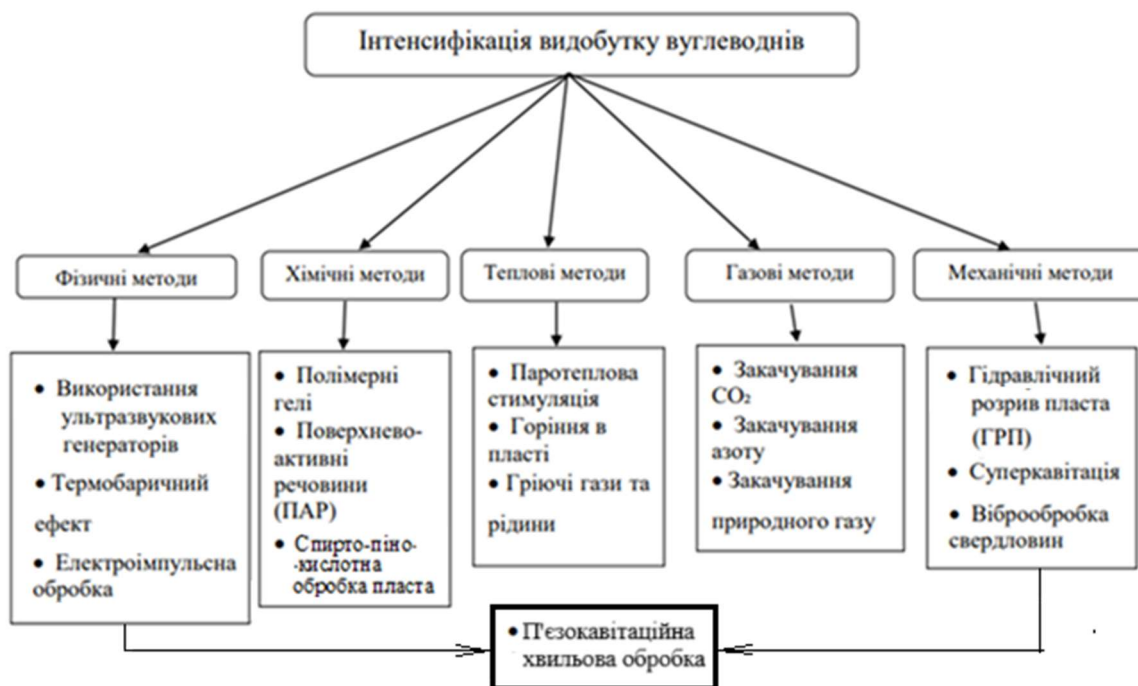


Рис.1. Схема реалізації основних методів інтенсифікації видобутку вуглеводнів з актуалізацією технології п'єзокавітаційної хвильової обробки

Вплив фізичних полів на процес кавітації пов'язаний з кількома основними факторами. Так вплив магнітного поля на водні кавітаційні системи, так чи інакше пов'язують цей вплив із наявністю у воді різного роду домішок. Однак є дані про те, що внаслідок дії магнітного поля відбуваються певні зміни в самій рідині. Вплив домішок, очевидно, має допоміжний характер, підсилюючи ефект під час вимірювання тих чи інших фізико-хімічних параметрів водних розчинів. Використання різних магнітних пристроїв зумовлює різний режим магнітної обробки: напруженість магнітного поля, його градієнт, швидкість протікання розчинів тощо. Огляд літературних даних стосовно дії магнітного поля на водні системи показує, що такий вплив є багатограним [3. с. 133], .

Крім того, електричне поле призводить до підвищення міцності рідини. Експериментально встановлено, що вона збільшується на 14%, що відповідає іонній теорії, яка пояснює стабілізацію парогазових пухирців в рідині. Розрив кавітаційного пухирця можна описати рівнянням Релея-Плессета [4] :

$$\frac{P_b(t) - P_z(t)}{p_L} = R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{4v_l}{t} \frac{dR}{dt} + \frac{2S}{p_L R}, \quad (1)$$

де $P_b(t)$ - тиск всередині бульбашки; $P_z(t)$ - зовнішній тиск, джерело якого знаходиться нескінченно далеко від бульбашки; p_L - густина навколишньої рідини; R - радіус бульбашки; v_l - кінематична в'язкість навколишньої рідини; S - поверхневий натяг бульбашки.

На рис. 2 наведена конструктивна схема функціонування пристрою реалізації п'єзокавітаційної хвильової обробки, а на рис. 3 - імітаційна модель реалізована в системі SolidWorks (Франція), яка за допомогою методу скінченних об'ємів дозволяє створити розрахункову сітку, а за рівняннями Нав'є Стокса дозволяє отримати розподіл швидкості та тиску по всій довжині пристрою. Встановлена частота коливань підпружиненого золотника 1 (рис.2) склала 18 Гц, що дозволяє реалізувати хвильовий процес впливу на привибійну зону свердловини.

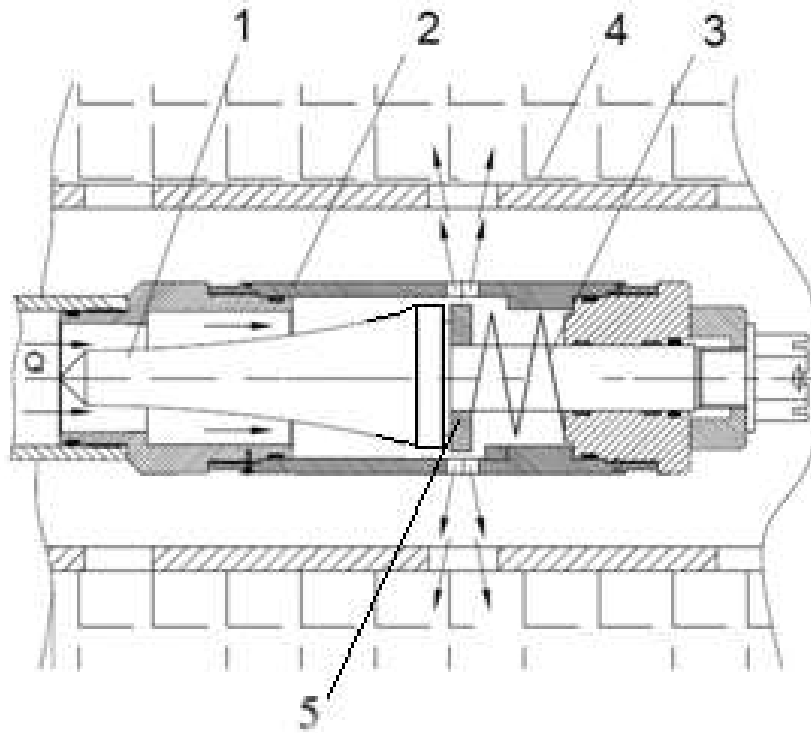


Рис.2. Конструктивно-функціональна схема п'єзокавітатора:
1 – підпружинений золотник, 2 – корпус, 3 – пружний елемент, 4 – обсадна колона, 5 – п'єзоелементний модуль

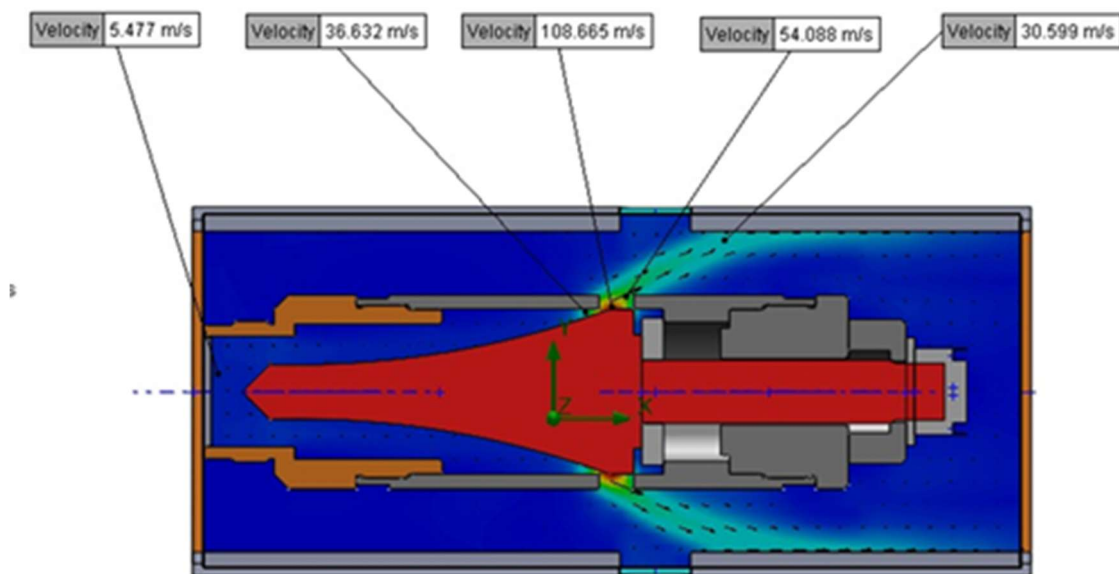


Рис.3. Фрагмент імітаційної моделі п'єзокавітатора в системі SolidWorks

З отриманих даних випливає, що періодичний тиск гідроудару, який виникає при перекритті струменя внутрішньою поверхнею обсадної колони за формулою Жуковського складає: $\Delta p = \rho \cdot c \cdot v \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^3$ МПа, де $\rho = 1,1$ кг/м³; $c = 1450$ м/с; $v = 30,599$ м/с (рис. 3).

П'єзоелементний модуль 5 (рис. 2) складається з п'єзоелектричних матеріалів, які мають властивість анізотропності, тобто такі властивості матеріалу, які залежать від напрямку сил і орієнтації електродів поляризації. П'єзоелектричний ефект через дію механічного тиску з боку пружинного елемента генерує електромагнітне поле, яке і впливає на кавітаційний процес, значно його підсилюючи. Найбільш ефективними рекомєнтовані п'єзокерамічні матеріали: PZT-4, PZT-8, PZT-5H [5].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що впровадження п'єзокавітаційної хвильової технології є ефективним засобом підвищення кавітаційного впливу на кольматанти, асфальтени та інші частинки які блокують гідравлічний зв'язок пластової системи з нафтовою свердловиною, що значно підвищить продуктивність видобутку вуглеводнів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Слідєнко В.М. Комплекс імпульсно-хвильової дії для підвищення продуктивності видобутку вуглеводнів/ В.М. Слідєнко, Л.К. Лістовщик, В.Є. Галба// Енергетика. Екологія. Людина. Наукові праці НТУУ «КПІ», ІЕЕ. – Київ: НТУУ «КПІ», ІЕЕ, №1 (39). 2015. – С. 60 – 65.
2. Слідєнко В. М., Поліщук В. О., Зубко А.В. Вплив фізичних полів на кавітаційні процеси генераторів коливань//Збірник матеріалів Першої міжнародної науково-методичної конференції – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – С. 45-47
3. Сілін Р.І., Гордєєв А.І., Сілін Р.С., Ланець О.С. Дослідження природи кавітаційно-магнітного впливу на воду та вібраційне обладнання для зміни її властивостей/ Автоматизація виробничих процесів у машинобудуванні та приладобудуванні. Вип. 47. 2013 С. 133-144.
4. Акустические свойства магнитных жидкостей и их применение в прикладной акустике, 13-й Конгресс ICA по акустике / П.П. Прохоренко, А.Р. Баев, Г.Е. Коновалов, Beograd, Vol. 4 (1989), с. 385–388.
5. Новиков А.О. Нелінійна модель рекуперативного амортизаційного пристрою/А.О. Новиков, В.М. Слідєнко/ Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4 С.76-82 DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290899

УДК 622.1:528

Назаренко Валентин Олексійович, д.т.н., проф., кафедра гірничої справи
 Бруй Ганна Валеріївна, к.т.н., доц., кафедра гірничої справи
 Волокітін Володимир Сергійович, магістрант, кафедра гірничої справи
 Технічний університет «Метінвест політехніка»

РОЗРАХУНОК ПОХИБКИ ПОЛОЖЕННЯ ВІДДАЛЕНОГО ПУНКТУ ПІДЗЕМНОГО ПОЛІГОНОМЕТРИЧНОГО ХОДУ

Анотація: на підставі аналізу різних схем розімкнених полігонометричних ходів, що мають ламану форму, отримано спрощену залежність похибки положення кінцевого пункту від довжини ходу, довжини замикаючої та кількості сторін. Відхилення результатів розрахунків за спрощеною формулою від розрахунків за суворим способом не перевищує 20%.

Ключові слова: полігонометричний хід, вимірювання, похибки, похибка координат.

Вступ. З усіх видів підземних зйомок маркшейдерів найбільш відповідальними є зйомки в підземних опорних мережах. Це зумовлено тим, що опорні мережі служать головною геометричною основою всіх підземних зйомок та від похибок визначення положення пунктів полігонометричних ходів, що утворюють мережі, залежить точність та надійність вирішення гірничо-геометричних інженерних завдань та складання маркшейдерських планів гірничих виробок.

Відповідно до вимог нормативних маркшейдерських документів [1, 2] середня квадратична похибка положення довільного (найвіддаленішого) пункту опорної мережі не повинна перевищувати 0,6 м для вугільних родовищ та 0,4 мм на плані для інших родовищ корисних копалин. Ці вимоги забезпечуються відповідною точністю та методикою виконання кутових та лінійних вимірювань у полігонометричних ходах.

Впровадження більш продуктивних способів розробки родовищ, застосування комплексної механізації, збільшення розмірів шахтних полів та процес об'єднання та укрупнення гірських підприємств призвели до того, що довжина полігонометричних ходів підземних опорних мереж сучасних шахт та рудників значно збільшилася та досягає десятків кілометрів. Через особливості побудови підземних опорних мереж створюються передумови для накопичення похибок вимірювань та певних труднощів щодо забезпечення необхідної точності положення пунктів полігонометричних ходів. Особливо це стосується віддалених точок опорних мереж.

Мета та завдання. Викладене вище пояснює необхідність виконання попередньої оцінки точності положення віддалених пунктів опорної мережі ще на стадії її проектування та вжиття відповідних заходів для підвищення точності у разі невиконання нормативних вимог.

Матеріал і результати досліджень. Розрахунок помилки положення віддаленого пункту опорної мережі, як правило, виконується як похибка кінцевого пункту вільного полігонометричного ходу (рис. 1) за відомою формулою (1)

$$M_K^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \sum_{i=1}^{i=n} R_i^2 + \mu^2 \sum_{i=1}^{i=n} l_i + \lambda^2 L^2, \quad (1)$$

де $m_{\beta_1}, m_{\beta_2}, m_{\beta_3}, \dots, m_{\beta_n}$ - Середні похибки вимірювань кутів; $R_i = R_1, R_2, \dots, R_n$ - Найкоротші відстані від точки K полігону до відповідних точок ходу; $l_i = l_1, l_2, l_3, \dots, l_n$ - Виміряна довжина сторін ходу; L - Довжина замикаючої, що з'єднує першу і останню точки ходу; λ -

Коефіцієнт, що виражає вплив систематичних похибок на одиницю довжини; μ - Коефіцієнт, що виражає вплив випадкових похибок на одиницю вимірюваної довжини.

Розрахунки за схемою рис. 1 можливі при відомих координатах точок полігонометричного ходу. У разі проектування підземної маркшейдерської опорної мережі положення точок ходу невідомо, з огляду на те, що у проекті побудови мережі встановлюють лише принципову схему, її основні конструктивні елементи, місця визначення опорних дирекційних кутів, місця примикання підземної мережі до пунктів на земній поверхні, місця замикання полігонів та місця встановлення постійних пунктів. Як наслідок застосування формули (1) для розрахунку точності положення віддаленого пункту стає неможливим.

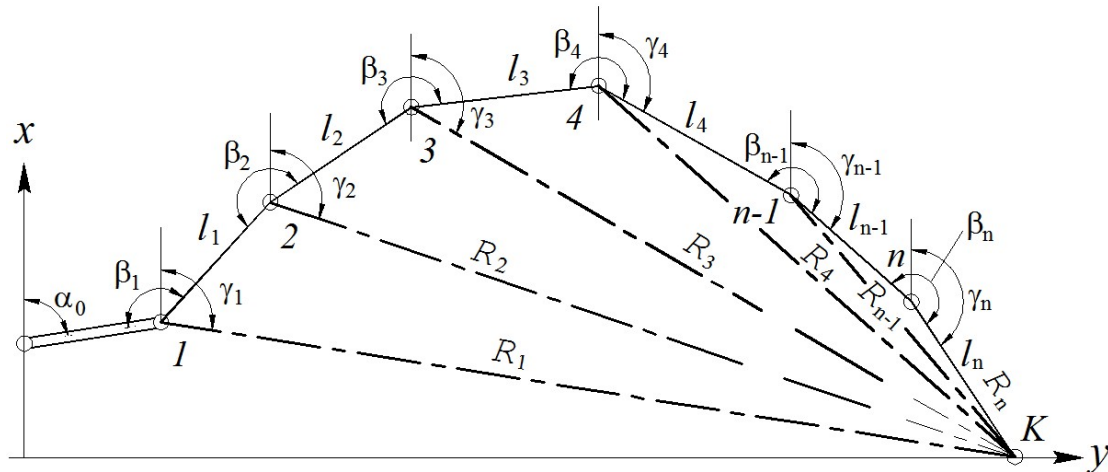


Рис. 1. Схема вільного полігонометричного ходу для розрахунку точності положення віддаленого пункту

У маркшейдерській практиці застосовуються спрощені методи оцінки точності полігонометричних ходів. Зокрема для розрахунку помилки положення пунктів витягнутих ходів від помилок кутів рекомендуються формули:

$$M^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \left(\frac{n+1,5}{3} \right); \quad (2)$$

$$M^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} L^2 \left(\frac{n}{3} \right). \quad (3)$$

У ходах ламаної форми помилки положення пунктів рекомендується виконувати за формулою

$$M_B^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} \cdot \frac{(\sum l + L)^2 n}{12} \quad (4)$$

Нами виконано розрахунок похибок віддалених точок (точка K) за строгою формулою (1) та спрощеними формулами (2-4). Усього виконано 54 варіанти розрахунків, що включають 9 різних схем (рис. 2), для кожної з яких змінювалися: довжина ходу $S = \sum l$, середня довжина сторони ходу l , кількість сторін ходу n і довжина замикаючої L . Результати розрахунків за формулою (1) та параметри аналізованих ходів наведені в таблиці 1.

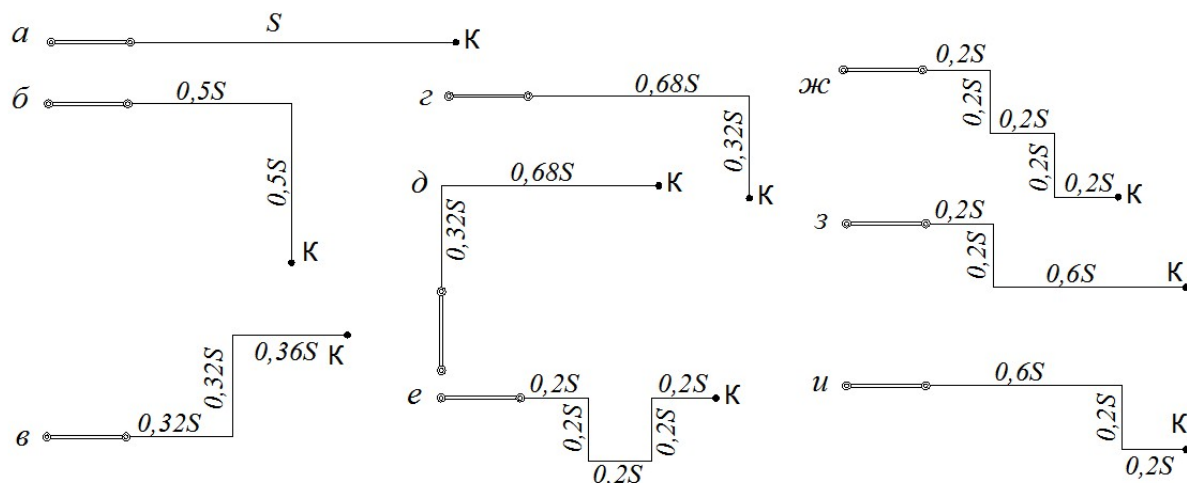


Рис. 2. Схеми аналізованих полігонометричних ходів

Таблиця 1

Параметри аналізованих полігонометричних ходів

S, м	2040		1980		3000		3960		6000		9000	
l, м	60		30		60		60		60		60	
n	34		66		50		66		100		150	
№ варіанта	$\sum R^2 \cdot 10^4, \text{м}^2$	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^4, \text{м}^2$	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^5, \text{м}^2$	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^5, \text{м}^2$	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^5, \text{м}^2$	L, м	$\sum R^2 \cdot 10^6, \text{м}^2$	L, м
а	4927	2040	8822	1980	1545	3000	3528	3960	12180	6000	4090	9000
б	3054	1442	5490	1400	960	2121	2195	2800	7590	4243	2551	6364
в	2741	1530	4901	1476	848	2227	1960	2952	6768	4481	2272	6708
г	3834	1530	6951	1490	1212	2255	2780	2980	9595	4509	3226	6764
д	2741	1530	4910	1490	859	2255	1963	2980	6775	4509	2275	6764
е	1857	1200	3311	1200	580	1800	1324	2400	4577	3600	1554	5460
ж	2563	1465	4589	1431	803	2163	1835	2862	6334	4327	2127	6490
з	3021	1674	5473	1637	954	2474	2189	3274	7515	4948	2522	7422
і	3762	1674	6660	1637	1191	2519	2663	3274	9243	4948	3105	7422

Надалі аналізі значення похибок M^2_K , розраховані за формулою (1) приймалися як зразок.

Аналіз результатів отриманих за формулами (2, 3) для витягнутого полігонометричного ходу (варіанту на рис. 2) показав практично повну збіжність з розрахунками по (1). Результати, отримані з використанням формули (4), вийшли значно завищеними. Максимальне відхилення спрощених розрахунків отримано для варіанта №6 і становить до 70%. Розподіл відносних помилок розрахунку за спрощеною формулою в залежності від схеми ламаного ходу показано на рисунках 3, 4.

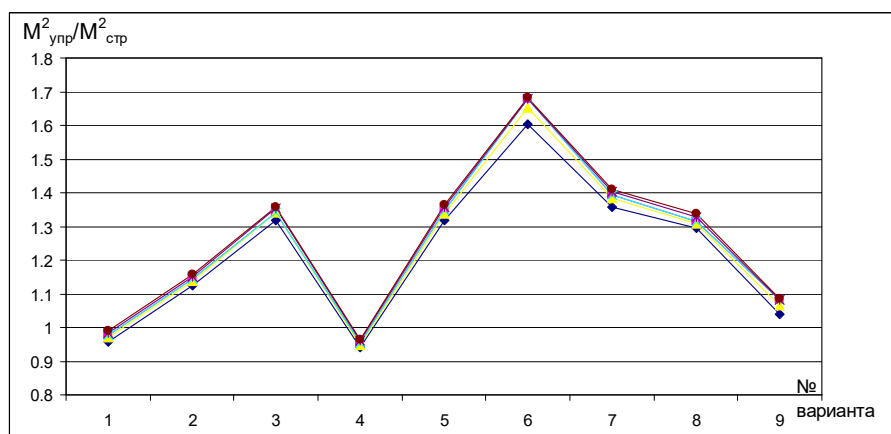


Рис. 3. Відносні похибки розрахунку за спрощеною формулою (4)

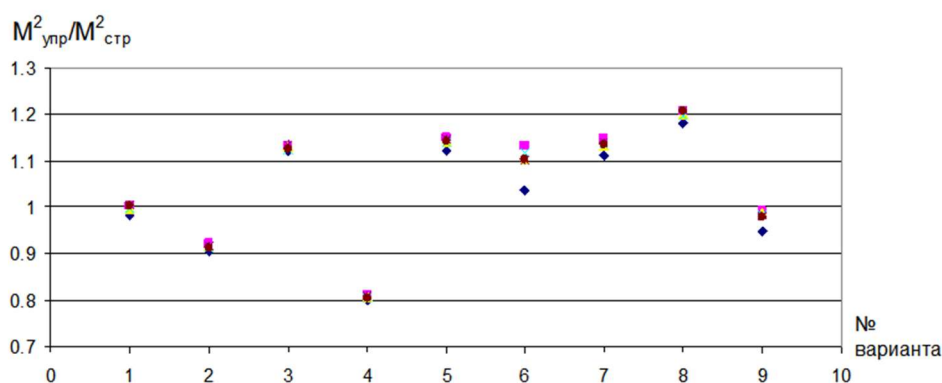


рис. 4. Відносні похибки розрахунку за спрощеною формулою (5)

Дослідження похибок положення кінцевих точок полігонометричних ходів ламаної форми різної конфігурації дозволили встановити залежність похибки від довжини ходу, довжини замикаючої та кількості сторін у ході. Для рівностороннього ходу ця похибка визначається виразом

$$M_K^2 = \frac{m_\beta^2}{\rho^2} n(0,5L - k \sum l_i) \sum l_i, \quad (5)$$

де k - Коефіцієнт, що залежить від довжини ходу; при $\sum l_i \leq 3000$ м $k = 0,158$; за 3000 м $\leq \sum l_i \leq 6000$ м $k = 0,16$; при $\sum l_i \geq 6000$ м $k = 0,162$.

Відхилення величин похибок, розрахованих за формулою (5) від еталонних значень для 54 варіантів полігонометричних ходів не перевищують 20% (див. рис. 4), що значно точніше за розрахунки за формулою (4).

Такий результат отриманий і при аналізі похибок полігонометричних ходів, що мають різні значення довжин l_i , обрані довільно в діапазоні від 30 до 240 м.

Висновки. На стадії проектування підземних маркшейдерських опорних мереж застосування строгих формул для розрахунку похибок полігонометричних ходів може виявитися неприйнятним через відсутність геометричної інформації про розташування пунктів ходів, що проектуються.

Спрощена формула, що рекомендується ВНИИМІ, для передрахунку похибки віддаленого пункту полігонометричного ходу ламаної форми дає завищені значення похибок,

які можуть в 1,7 рази перевищувати результати розрахунків за суворою формулою.

Встановлено, що основними параметрами полігонометричного ходу ламаної форми, що визначають величину похибки положення його кінцевої точки від похибок кутових вимірювань, є: довжина ходу, довжина його замикаючої та кількість сторін ходу.

Отримана в результаті досліджень формула для спрощеного розрахунку дозволяє визначити похибку положення кінцевої точки полігонометричного ходу ламаної форми з точністю 20%, що задовольняє точності інженерних розрахунків. Застосування цієї формули значно спрощує маркшейдерські розрахунки за відсутності необхідної геометричної інформації про положення пунктів полігонометричних ходів, що проектується.

Список літератури

1. Surveying robots in coal mines and open pits. Instructions // Redkomis. : M.E.Kaplanets (head) and in. - View. official - Donetsk: TOV "ALAN", 2001. - 264 p.
2. Instructions for the production of surveying robots // Ministry of Coal Industry of the USSR. - M.: Nadra, 1987. - 240 p.
3. Mine surveyor on the right: Handbook for universities // D.N. Ogloblin, G.I. Gerasimenko, A.G. Akimov and in. - 3 types, recycled. ta add. - M., Nadra, 1981. - 704 p.
4. A practical guide to the use of underground surveying support lines. - L.: UNIMI, 1970. - 258 p.
5. Methodical insertions to ensure the preparation of underground survey support lines. - L.: UNIMI, 1975. - 126 p.
6. NPAON 74.2-1.07-21 Rules for the determination of mine surveying work during the development of ore and non-metallic bark copaline genera. – 2021. – 260 p.
7. John Walker, Joseph Awange. Surveying for Civil and Mine Engineers. Acquire the Skills in Weeks. – Springer. – 2020. – 411p. doi.org/10.1007/978-3-030-45803-4.
8. John Walker • Joseph L. Awange. Surveying for Civil and Mine Engineers. Theory, Workshops, and Practicals. – Springer. – 2018. – 271p. - DOI 10.1007/978-3-319-53129-8.

**Nazarenko V., Brui H., Volokitin V.,
Department of Mining, Metinvest Polytechnic Technical University.**

CALCULATION OF THE ERROR OF THE POSITION OF A REMOTE POINT OF AN UNDERGROUND POLYGONOMETRIC PASSAGE.

On the basis of various schemes opened polygonal traverses analysis having the broken form, the simplified dependence of distant point position error on length of a traverse, lengths closing and quantities of the parties is received. The deviation of results of calculations under the simplified formula from calculations on a strict way does not exceed 20 %.

Keywords: polygonometric run, measurements, errors, coordinate error.

УДК 628.4:504.05:620.9

Торунда К.В., магістр, гр.ЗКК-24м
Кушнірук Н.В., доцент кафедри збагачення корисних копалин і хімії
Криворізький національний університет

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАЛУЧЕННЯ ДО ВИРОБНИЦТВА ТЕХНОГЕННОЇ СИРОВИНИ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ НА ЗОВНІШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ

Анотація

У роботі розглянуто актуальність використання техногенної сировини як одного з ключових шляхів зменшення негативного впливу промисловості на довкілля. Наголошено на значних обсягах промислових відходів, зокрема хвостосховищ, відвалів, шлаків та золи, що накопичуються внаслідок діяльності гірничо-збагачувальних комбінатів, металургійних та теплоенергетичних підприємств. Автори обґрунтовують доцільність залучення таких відходів до виробництва, що забезпечить збереження природних ресурсів, зменшенню енергоспоживання та підвищенню екологічної безпеки. Представлено приклади впровадження технологій переробки техногенної сировини в країнах Європи, Азії та США. Окрему увагу приділено практиці України, де вже застосовуються техногенні відходи у будівництві доріг, виробництві бетону та інших галузях. Підкреслено економічні переваги повторного використання відходів, зокрема зниження витрат підприємств і створення нових робочих місць. Водночас акцентовано на потребі вдосконалення нормативно-правової бази, що регулює використання вторинної сировини, зокрема шляхом запровадження стандартів якості, регламентів класифікації та стимулювання бізнесу через пільги. Робота має на меті сприяти формуванню науково обґрунтованої стратегії сталого розвитку, в якій техногенна сировина розглядається не як відходи, а як цінний ресурс майбутнього.

Вступ

У сучасних умовах зростання промислового виробництва спричиняє значне накопичення техногенних відходів, які суттєво впливають на стан навколишнього середовища. До таких відходів належать не лише побічні продукти металургії чи теплоенергетики, але й великомасштабні утворення, як-от хвостосховища та відвали гірничо-збагачувальних підприємств, що займають значні території та становлять потенційну екологічну загрозу. Відходи промисловості на сьогодні використовують в якості відсіпки доріг та будівництві дамб хвостосховищ. Заскладовані відходи та відходи поточного видобутку можна розглядати в якості техногенної сировини [1].

Техногенна сировина – це побічний продукт промислової діяльності, який може бути використаний як вторинний ресурс. Використання таких матеріалів сприяє економії природних ресурсів і зменшенню енергоспоживання. Отже, впровадження технологій переробки техногенної сировини має важливе значення для зниження негативного впливу за екологічний стан регіону, а також забезпечення розвитку промисловості. Екологічна безпека стає ключовим чинником при плануванні виробничих стратегій [1].

Мета дослідження:

Обґрунтувати необхідність і результативність використання техногенної сировини промислового походження у виробничих циклах задля мінімізації їхнього шкідливого впливу на навколишнє середовище та забезпечення переходу до моделі безвідходного виробництва.

Завдання дослідження:

Визначити та зробити аналіз основних джерел техногенної сировини та їхнього впливу екологію регіону.

Оцінити сучасні технології переробки та повторного використання техногенних відходів.

Визначити проблеми правового регулювання в Україні у сфері обігу техногенної сировини.

Запропонувати напрями удосконалення державної політики з урахуванням принципів циркулярної економіки.

Основна частина

Серед основних джерел техногенної сировини можна виокремити металургійні шлаки, золівідвали теплоелектростанцій, відходи будівництва та гірничодобувної промисловості [2]. Ці матеріали мають високий потенціал до повторного використання у виробництві будівельних матеріалів, дорожньому будівництві та навіть у хімічній промисловості. Розвиток технологій дозволяє ефективно очищати й модифікувати такі ресурси до стану, придатного для вторинного використання. За умов належної класифікації та стандартизації, техногенна сировина може повноцінно замінити природні матеріали [3]. Це сприяє зменшенню впливу на екосистеми, пов'язаного з добуванням первинних ресурсів. Крім того, знижується навантаження на полігони промислових відходів. Розширення практики залучення вторинної сировини є одним із пріоритетів сучасної екологічної політики.

У низці країн уже реалізовані масштабні проекти із залучення техногенної сировини. Наприклад, у Німеччині золівідвали ТЕС активно використовуються як сировина для виробництва цементу, що дозволяє значно зменшити викиди CO₂ у будівництві. У Швеції металургійні шлаки застосовують у дорожньому будівництві як альтернатива гравію, що допомагає зберігати природні ресурси. У Японії функціонує національна програма з переробки будівельних відходів, які використовуються повторно у вигляді дорожніх підсіпок та бетонних сумішей [4]. Сполучені Штати Америки мають добре розвинену інфраструктуру для повторного використання відходів вугільної промисловості, зокрема у виробництві гіпсу та цегли. Китай, з огляду на масштабність гірничодобувного сектору, запровадив інноваційні технології для перетворення шахтних відходів на будівельні блоки та плитку. Ці приклади свідчать про високий потенціал використання техногенних ресурсів на практиці, що може бути адаптовано й для України з урахуванням місцевих умов.

В Україні техногенні відходи, зокрема металургійні шлаки та золу, широко застосовуються у будівництві. Ці матеріали використовуються для виробництва будівельних матеріалів, таких як бетонні суміші, дорожні покриття та інші конструкційні елементи.

Залучення техногенних ресурсів до виробництва також має вагоме економічне обґрунтування. Переробка відходів дозволяє підприємствам зменшити витрати на закупівлю первинної сировини та знижує вартість кінцевої продукції. Крім того, це створює нові робочі місця у сфері сортування, транспортування та переробки матеріалів [5]. Інвестиції в технології переробки окуповуються завдяки отриманим прибуткам і зменшенню штрафів за порушення екологічного законодавства. У світі дедалі активніше впроваджується модель циркулярної економіки, яка спрямована на повне залучення техногенної сировини до виробництва [6]. Україна також має потенціал для інтеграції в ці процеси. Стимулювання підприємств до використання техногенної сировини є важливим кроком у напрямку екологічної модернізації.

З погляду правового регулювання, залучення техногенної сировини потребує удосконалення нормативно-правової бази [7]. На сьогодні існує низка законодавчих прогалин, які ускладнюють легалізацію та стандартизацію вторинної сировини [8]. Необхідно розробити чіткі критерії класифікації техногенних матеріалів, визначити відповідні технічні регламенти та методики контролю якості. Держава повинна сприяти інноваціям через надання податкових пільг, грантів та консультативної підтримки. Важливо також налагодити ефективну систему моніторингу екологічних наслідків повторного використання техногенних відходів. Застосування такого підходу дозволить узгодити економічні вигоди з вимогами охорони довкілля. Удосконалення законодавчого регулювання може стати ключовим чинником для активного розвитку сфери повторного використання техногенних ресурсів.

Висновки

Використання техногенної сировини є одним із найбільш перспективних напрямів у сфері збереження довкілля та раціонального використання ресурсів. Воно сприяє зниженню антропогенного навантаження на природу, зменшенню обсягів забруднення та покращенню екологічної ситуації. Разом з тим, це надає нові можливості для розвитку та розширення підприємств, підвищення їх конкурентоспроможності та інтеграції у світові екологічні ініціативи. Важливо усвідомлювати, що питання повторного використання техногенних матеріалів є не лише технологічним, а й соціальним викликом. Тому залучення до цього процесу потребує співпраці між державою, бізнесом та громадськістю. Такий комплексний підхід забезпечить ефективне вирішення екологічних проблем сьогодення. Техногенна сировина може стати ресурсом майбутнього, за умови відповідального та науково обґрунтованого підходу.

Список використаних джерел

1. Антонік В., Антонік І. Вплив місць накопичення відходів гірничо-збагачувальних комбінатів на гідросферу прилеглих територій // *Біологія та екологія*. 2024. Т. 10, № 1. С. 72–77. DOI: <https://doi.org/10.33989/2024.10.1.306014>.
2. Металургійні шлаки та інші відходи виробництва використовуватимуться у дорожніх роботах // *Ecolog-ua.com*. Прес-служба Мінінфраструктури України. URL: <https://ecolog-ua.com/news/metallurgiyini-shlaky-ta-inshi-vidhody-vyrobnyctva-vykorystovuvaty-mutsya-u-dorozhnikh-robotah> (дата звернення: 02.05.2025).
3. Moshkal M., Akhapor Y., Ogihara A. Sustainable waste management in Japan: Challenges, achievements, and future prospects: A review // *Sustainability*. 2024. Vol. 16, 7347. DOI: 10.3390/su16177347.
4. Станкевич С. В., Головань Л. В., Білецький Є. М. та ін. *Управління та рекуперація відходів: навч. посіб.* Харків: Видавництво Іванченка І. С., 2020. 134 с.
5. Іванов Є. А., Біланюк В. І. Ефективність використання мінеральної сировини і гірничопромислових відходів в Україні // *Надрокористування в Україні. Перспективи інвестування: матеріали II міжнар. наук.-практ. конф.* (м. Трускавець, 5–8 жовтня 2015 р.). Київ: ДКЗ, 2015. С. 344–351.
6. Бердинських О. Дохід з відходів: Україна може подвоїти переробку та експорт шлаків // *GMK Center*. URL: <https://gmk.center/ua/posts/dohid-z-vidhodiv-ukraina-mozhe-podvoiti-pererobku-ta-eksport-shlakiv> (дата звернення: 02.05.2025).
7. Бузило В., Павличенко А., Деменко О. Шляхи вирішення проблем поводження з відходами видобутку мінеральної сировини // *X науково-практична конференція «Школа підземної розробки»*, Бердянськ, Україна, 2017. С. 13–14.
8. Закон України «Про відходи»: Закон України від 30.06.2023 № 2320-IX // *Офіційний вісник України*. 2023. № 57. Ст. 3234.

УДК 622.1:622.834

Назаренко Валентин Олексійович, д.т.н., проф., кафедра гірничої справи
Бруй Ганна Валеріївна, к.т.н., доц., кафедра гірничої справи
Новицький Георгій Анатолійович, магістрант, кафедра гірничої справи
 Технічний університет «Метінвест політехніка»

ОСІДАННЯ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ВІДХОДІ ЛАВИ ВІД РОЗРІЗНОЇ ПЕЧІ

Анотація. За результатами натурних інструментальних спостережень розроблена просторово-часова модель формування мульди зрушення для умов вугільних шахт Західного Донбасу. Запропоновано новий тип ізоліній, що характеризують час і місце виникнення в мульді осідань певної величини.

Ключові слова: вугільна лава, зрушення гірських порід, осідання поверхні.

Вступ. Будівництво та експлуатація будівель і споруд на територіях залягання корисних копалин здійснюється з обов'язковим гірничо-геологічним обґрунтуванням і дотриманням заходів з охорони від шкідливого впливу гірничих розробок. Невід'ємною складовою такого гірничо-геологічного обґрунтування та основою для вибору відповідних заходів охорони підроблюваних будівель і споруд є розрахунок очікуваних зрушень і деформацій земної поверхні. В теперішній час на вугільних родовищах зрушення і деформації поверхні розраховуються за нормативною методикою Правил [1]. Використання цієї методики має певні обмеження. Зокрема, обов'язковою є умова завершеного процесу зрушення гірських порід і земної поверхні, що в значній мірі звужує можливість прогнозування впливу гірничих розробок на підроблювані об'єкти. Результати розрахунків не дають уяви про тривалість процесу зрушення, не враховують відмінності розвитку деформацій на різних ділянках зони впливу очисних робіт. Самі розрахунки за методикою [1] є громіздкими, незручними та не в повній мірі враховують особливості процесу зрушення в різних гірничо-геологічних умовах відпрацювання вугільних пластів.

Мета та завдання. В результаті маркшейдерських досліджень на вугільних родовищах розроблені різні способи розрахунку зрушень і деформацій поверхні над очисним вибоєм, що рухається. Основні положення цих способів розрахунку для умов Центрального Донбасу викладені в роботах [2-4], Львівсько-Волинського вугільного басейну – в [5], Західного Донбасу – у [6, 7]. Вказані дослідження виконані для умов стадії синхронного зрушення, коли в мульді сформувалося плоске дно і профіль крила мульди, яке рухається, залишається незмінним і переміщується синхронно з очисним вибоєм. Область формування мульди, яка виникає при відході лави від розрізної печі, залишається маловивченою.

Якщо розглянути всю мульду зрушення в цілому, то виявиться, що область її формування займає значну площу. Відповідно Правилам підробки [1] розмір L області формування мульди в напрямку посування очисного вибою складе (при пологому заляганні розроблюваного вугільного пласта і відсутності наносів):

$$L = L_1 + L_2,$$

$$L_1 = (H + \frac{D_1}{2} \sin \alpha) \cdot [\operatorname{ctg} \beta_0 + \operatorname{ctg}(\psi_1 + \alpha)]$$

$$L_2 = (H - \frac{D_1}{2} \sin \alpha) \cdot [\operatorname{ctg} \gamma_0 + \operatorname{ctg}(\psi_2 - \alpha)]$$

де H – середня глибина розробки, м; D_1 – розмір очисної виробки вхрест простягання, м; α – кут падіння пласта, град; γ_0 , β_0 – граничні кути відповідно по підняття та підняття, град; ψ_1 ,

$\psi/2$ – кути повних зрушень, град.

Наприклад при глибині розробки $H = 200$ м і $\alpha = 0^\circ$ розмір L складе 460 м, а при глибині $H = 500$ м величина L досягне 1160 м. Якщо врахувати потужність наносів, а вони в Західному Донбасі складають 50-200 м, то розміри області формування мульди в напрямку посування очисного вибою виявляться значно більшими. З наведеного прикладу видно, що в мульді зрушення на земній поверхні є значна область, в якій закономірності зрушення і деформування поверхні залишаються невивченими.

Загальна методика досліджень і результати. Ґрунтуючись на загальноприйнятих уявленнях про процес зрушення земної поверхні й особливості його розвитку, що встановлені натурними маркшейдерськими спостереженнями на шахтах Західного Донбасу, нами розроблена методика просторово-часового моделювання зрушень земної поверхні [10]. Ця методика дозволяє створити графічну модель розвитку зрушень і деформацій над очисним вибоєм, що рухається, до моменту, поки підробка поверхні стане повною.

Практична побудова просторово-часової моделі процесу зрушення земної поверхні показана на прикладі спостережної станції № 10, що закладена над 530-ю лавою пласта с'6 шахти «Ювілейна» ВАТ «Павлоградвугілля». На рис.1 показані план станції й графіки осідань земної поверхні вздовж профільної лінії реперів № 1.

Лава 530 почала відпрацьовуватись на глибині 150 м, потужність наносів становить 60 м, відношення потужностей порід наносів і карбону – 0,40, потужність пласта – 1,0 м. Максимальне осідання в мульді $\eta_m = 922$ мм.

При побудові моделі використані результати 11 серій інструментальних спостережень, проведених протягом 2 місяців з початку відпрацьовування лав. Кожне спостереження відображає осідання земної поверхні, що відповідає розміру виробленого простору D_t на дату спостереження t .

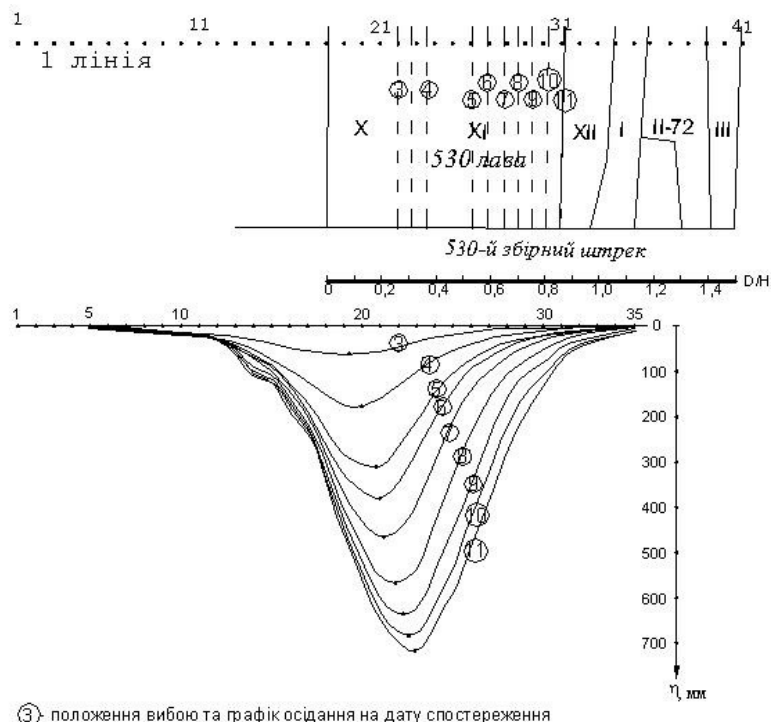


Рис. 1. План спостережної станції №10 і графіки осідання земної поверхні над 530-ю лавою

З урахуванням глибини розробки H і величини посування очисного вибою D_t на дату спостереження створюється спеціальна система координат (рис.2, а), по осі абсцис якої відкладаються відстані від проекції розрізної печі на земній поверхні, віднесені до глибини H (убік руху очисного вибою зі знаком «плюс», убік масиву – зі знаком «мінус»). По осі ординат

відкладаються розміри виробленого простору D_t у напрямку руху очисного вибою, віднесені до глибини H , тобто положення очисного вибою у часі.

У цій системі координат проводяться горизонтальні лінії з ординатами, що відповідають положенням вибою на дати спостережень. Ці лінії повинні відображати профіль мульди зрушення на земній поверхні вздовж лінії реперів спостережної станції на дату відповідного спостереження. У новій системі координат відбудовуються графіки осідань. При цьому кожен графік має свою локальну систему координат, осями абсцис якої є раніше проведені горизонтальні лінії, а віссю ординат – вісь осідань η . Прив'язка графіків по горизонталі здійснюється відносно точки «0» (проекція розрізної печі) осі абсцис вихідної системи координат. Якщо врахувати, що поточний розмір виробленого простору D_t є функцією від часу t , то графіки виявляються «рознесеними» у часі. Наступний крок створення моделі процесу зрушення полягає у визначенні на графіках осідань точок з величинами осідання кратними $0,1\eta_m$ (рис. 2, а) і перенесенні цих точок з графіків на вісь абсцис відповідної локальної системи координат (рис. 2, б). Точки з однаковими відмітками на всіх локальних графіках з'єднуються плавними лініями.

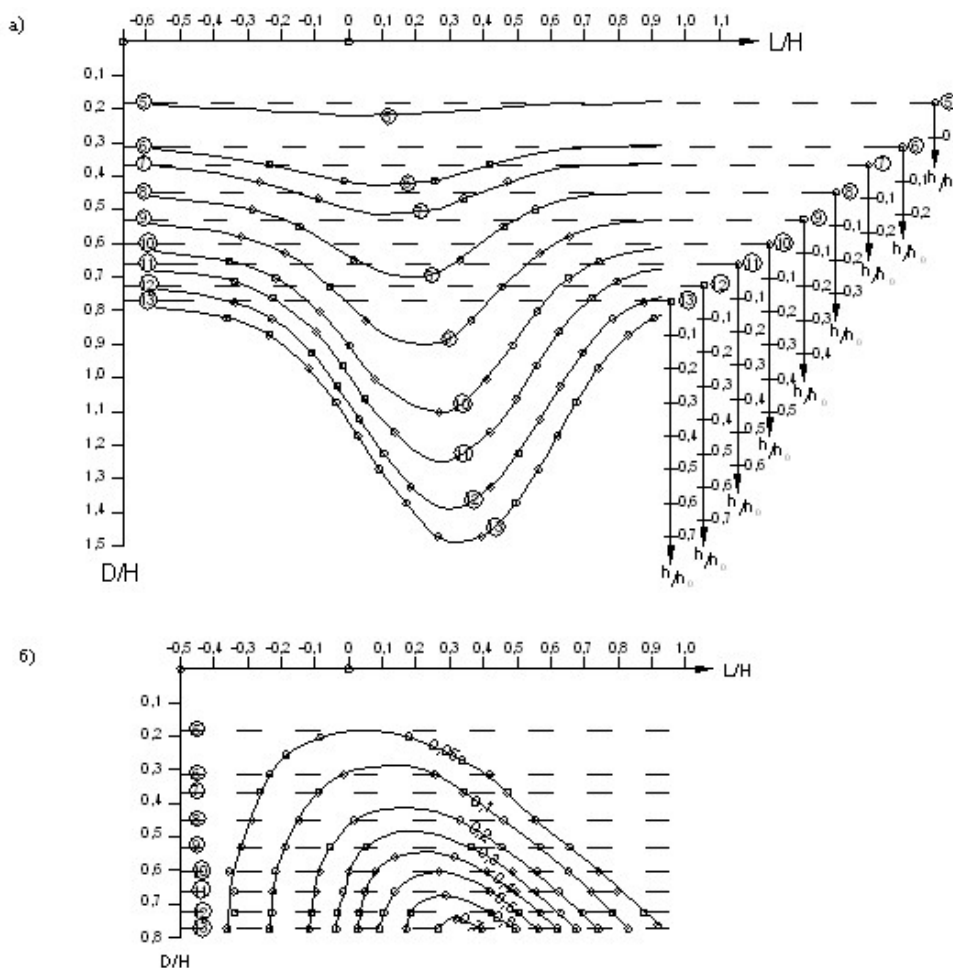


Рис. 2. Графіки осідання земної поверхні над 530-ю лавою: а) – рознесені в часі і розміщені в локальних системах координат; б) – представлені ізолініями

Фізичний зміст отриманих ліній полягає в тому, що вони характеризують час утворення й розташування в мульді значень осідань, кратних $0,1\eta_m$.

У практиці вивчення зрушення земної поверхні над гірничими розробками аналогів отриманих нами ізоліній немає. Виходячи з фізичної сутності, ці ізолінії можуть бути названі

«хроноізоосіданнями».

Побудована модель зрушення дозволяє визначити осідання земної поверхні на будь-який довільний момент часу t . Для цього достатньо знати розмір виробленого простору D_t . Здійснюється це в такий спосіб. На графіку рис. 2, б проводимо горизонтальну лінію з ординатою D_t/H , знаходимо точки її перетинання з лініями хроноізоосідань і за значеннями цих ізоолій відкладаємо вниз величини осідань. Лінія, що з'єднує кінці відкладених відрізків, утворює профіль мульди зрушення на момент часу t .

Аналогічні просторово-часові моделі процесу осідання земної поверхні побудовані по спостережних станціях № 13, 14 (ш. "Степова") і № 9, 12 (ш. "Ювілейна"). Після перетворень, що враховують розходження гірничо-геологічних умов підробки земної поверхні, складено сполучену просторово-часову модель, зображену на рис. 3.

Як видно з рис. 3, лінії хроноізоосідань з однаковими відмітками по різних спостережних станціях розташовуються близько одна від одної, а в деяких випадках збігаються. Цей факт свідчить про "працездатність" моделі в різних гірничо-геологічних умовах Західного Донбасу й дає передумови до створення загальної для шахт Західного Донбасу моделі осідання земної поверхні над очисним вибоєм, що рухається.

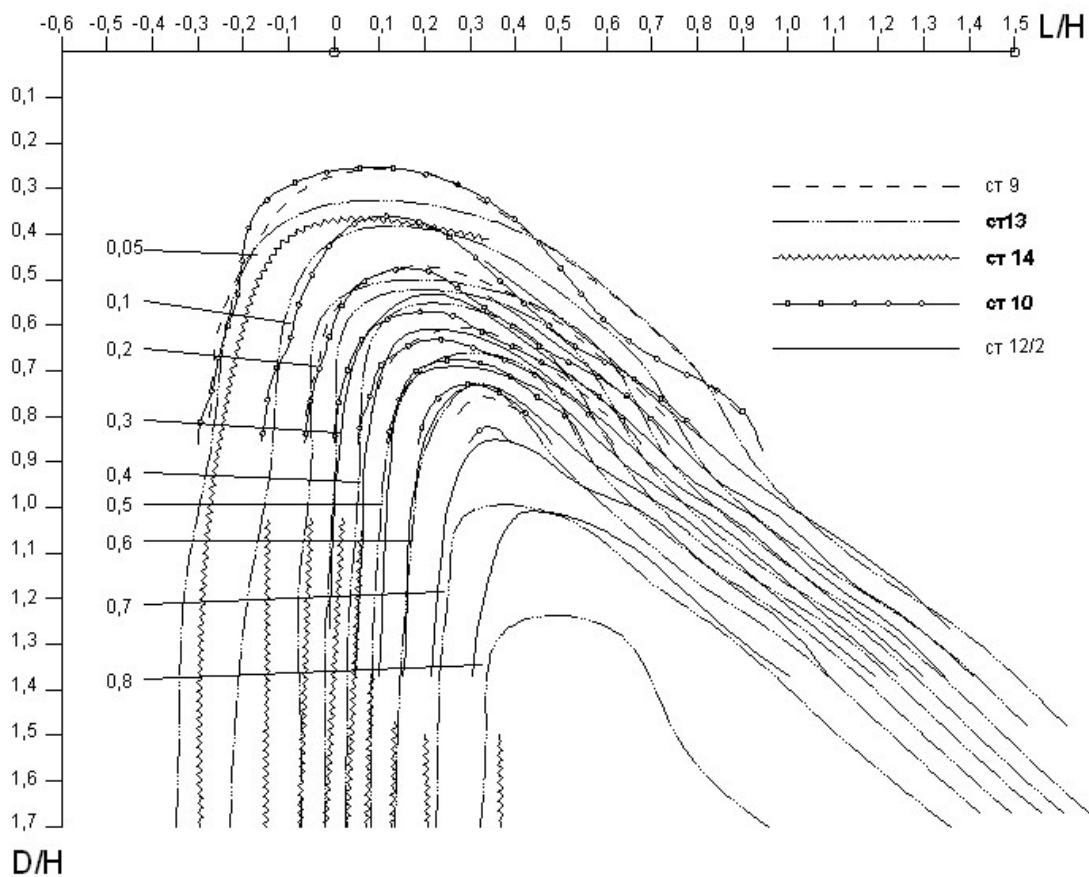


Рис. 3. Сполучена просторово-часова модель процесу осідання земної поверхні

Висновки.

У результаті виконаних досліджень на підставі аналізу натурних інструментальних маркшейдерських спостережень за зрушенням земної поверхні на вугільних шахтах Західного Донбасу розроблена й апробована просторово-часова модель формування мульди зрушення над очисним вибоєм, що рухається. Ґрунтуючись на отриманих результатах, запропоновано новий тип ізоолій, що характеризують утворення у часі осідань певної величини в головному

перетині мульди за напрямком руху очисного вибою. Виходячи з фізичної сутності цих ізоліній, вони названі лініями хроноізоосідань.

Після розширення бази даних натурних спостережень й оцінки їх точності спільний аналіз моделей для різних гірничо-геологічних умов дасть підставу для створення загальної моделі зрушення для умов Західного Донбасу.

Результати виконаних досліджень є оригінальними, не мають аналогів і можуть бути використані для розробки моделі процесу зрушення на вугільних шахтах Львівсько-Волинського родовища та районів Центрального Донбасу з горизонтальним і пологим заляганням вугільних пластів.

Узагальнена модель процесу зрушення призначена для прогнозування зрушень земної поверхні над гірничими розробками вугільних шахт без виконання складних і громіздких обчислень.

Список літератури

1. Rules for the undermining of buildings, structures and natural objects during underground coal mining: Industry standard. - K.: Minpalivenergo of Ukraine, 2004. - 127 p.
2. Avershin S.G. Calculation of rock movements. - M.: Metallurgizdat, 1950. - 230 p.
3. Batugin S.A. Influence of the speed of advance of the working face on the movements and deformations of the earth's surface // Works on issues of rock pressure, rock movements and methods of mine surveying / VNIMI. - L.: Publ. VNIMI, 1963. - Collection 50. - P. 83-90.
4. Medyanecv A.N. Determination of the intensity of the earth's surface shift above mine workings // Shifts and deformations of the massif during deposit development taking into account the structure and mechanical properties of rocks / VNIMI. - 1968. - Collection 68. - P. 343-348.
5. Iofis M.A., Fastov G.A. The nature of deformation development in the half-trough above the moving face // Rock pressure, rock shift and surveying methods / VNIMI. - 1965. - Collection 55. - P. 143-149.
6. Petruk E.G. Study of earth's surface deformations in the shift trough over time // News of universities. Mining journal. - 1969. - No. 1. - P. 40-43.
7. Nazarenko V.A. On the geometrization of the surface of the displacement trough above the moving working face by the isoline method // Scientific Bulletin of the NSA of Ukraine. - 2003. - №1. - P. 12-16.
8. Doney, E.D., Peng, S.S. and Luo, Y. Subsidence Prediction in Illinois Coal Basin // 10th International Conference on Ground Control in Mining. - 2003. - p.p. 212-219.
9. Nazarenko V.O., Yoshchenko N.V., Stelmashchuk E.V. Regularities of the location of maximum subsidence of the earth's surface in the displacement trough // Scientific Bulletin of NSU. - 2006. - №10 - P. 8-12.
10. Nazarenko V.A., Stelmashchuk E.V. Spatio-temporal modeling of the displacement trough during its formation // Geotechnical mechanics: Interdisciplinary. zb. Sci. prac/ Institute of Geotechnical Mechanics im. M.S. Polyakov NAS of Ukraine. – Dnipropetrovsk, 2007. – VIP. 72. – pp. 25-31.

Nazarenko V., Brui H., Novitski G.,

Department of Mining, Metinvest Polytechnic Technical University.

SUBSIDENCE OF THE EARTH'S SURFACE WHEN LAVA FLOWS FROM A SPLIT FURNACE

The surface subsidence in Western Donbas coal mines is analyzed. A spatial-temporal model of earth's surface subsidence is developed. A new type of contour is proposed. These lines characterize the time and place where the certain subsidence are formed.

Keywords: coal lava, rock shifts, surface subsidence.

УДК 624.1

Лепешко А.А., аспірант, ORCID 0000-0002-6018-3596
Київський національний університет будівництва і архітектури

КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ СТАНЦІЇ МЕТРОПОЛІТЕНУ CONSTRUCTIVE SOLUTIONS OF METRO STATIONS

Анотація. З сучасним розвитком міст та 11ї цілі сталого розвитку яка акцентована на сталому розвитку міст та спільнот, показує тенденцію до збільшення населених пунктів [1]. Таке збільшення як правило припадає на міста мільйонники, що в свою чергу свідчить про необхідність впровадження та будівництва системи метрополітену. Крім того, в існуючих міста які вже мають свій метрополітен, добудовують нові станції метро і тенденція до їхнього будівництва постійно зростає [2, 3]. Будівельні технології на сьогоднішній день також розвиваються і мають особливе значення у використанні при складних умовах геологічного простору. Саме через потребу в розвитку будівництва метрополітенів дана тема набуває актуальності для її дослідження.

Ключові слова: метрополітен, станція метрополітену, будівництво.

Abstract. With the modern development of cities and the 11th goal of sustainable development, which is focused on the sustainable development of cities and communities, shows a tendency to increase settlements [1]. Such an increase, as a rule, falls on cities with millions, which in turn indicates the need for the introduction and construction of a subway system. In addition, in existing cities that already have their own subway, new subway stations are being built, and the trend towards their construction is constantly growing [2, 3]. Today, construction technologies are also developing and are of particular importance when used in difficult geological conditions. It is precisely because of the need for the development of subway construction that this work becomes relevant for its research.

Key words: metro, metro station, construction

Вступ. Конструктивні рішення станції метрополітену відіграють важливу роль в їх будівництві. Вибір варіанту конструкції залежить від оточуючих умов закладання станції метрополітену, а саме від інженерно-геологічних умов і матеріалів, які використовуються для оправи станцій [4]. Станції метрополітенів проектують і будують одно-, двох-, та трьох-склепінні. Конструктивна форма станції визначається також способом спорудження, закритим способом споруджуються станції як правило колонного та склепінного типу.

Одна з проблем спорудження станцій метрополітенів полягає у виборі найзручніших конструктивних рішень, які будуть в першу чергу надійнішими за існуючі варіанти. Зв'язок даної проблеми з науковими та практичними завданнями заключається у проведенні пошуку та аналізу таких існуючих конструкцій, для того, щоб обрати найефективніше рішення, яке буде виконувати основні завдання, щодо збереження міцності споруди. Аналогічними питаннями займалися такі вчені як Айвазов Ю.М., Петренко В.Д., Полянкін Г.Н. та інші.

Метою завдання виступає розглянути нові конструктивні рішення та визначити їхні якісні відмінності.

Матеріал і результати дослідження. Для вибору найкращого типу станції необхідно провести ряд досліджень які включають в себе показники міцності при різних умовах будівництва, в залежності від глибини закладання самої станції та її конструктивного рішення. При цьому слід звернути увагу на деформування ґрунтових масивів, які утворюються від навантажень геологічних тисків, з подальшим передаванням їх на конструктивні елементи станції.

Згідно з попередніми визначеннями, значну перевагу можна надати склепінчастій

станції, яка в даному випадку є більш надійною за своїми параметрами. Основним елементом склепінчастої станції виступає його опора на яку опираються верхнє та нижнє перекриття (рис.1). Конструктивне рішення даних елементів може виконуватися різними конфігураціями від яких буде залежати витрати матеріалів та забезпечена міцність всієї станції.

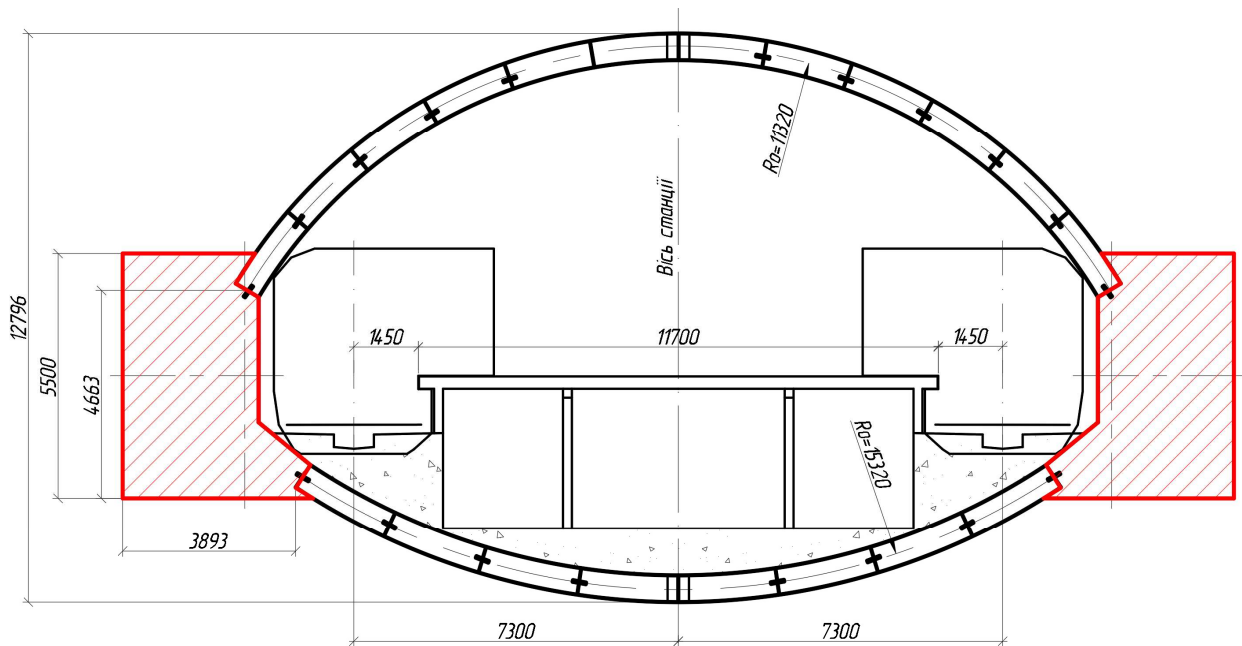


Рисунок 1. Конструкція склепінчастої станції

Було розглянуто 3 варіанти склепінчастої станції з різними опорними конструктивними рішеннями. Основні параметри станції залишаються однаковими, заміна відбувається лише опорного конструктивного елементу, на який опираються інші залізобетонні конструкції з врахуванням зовнішніх напружень. Детальніше варіанти опорних конструктивних елементів показані на рис. 2 відповідно варіант №1 на рис. 2 а, варіант №2 на рис. 2 б, та варіант №3 на рис. 2 в.

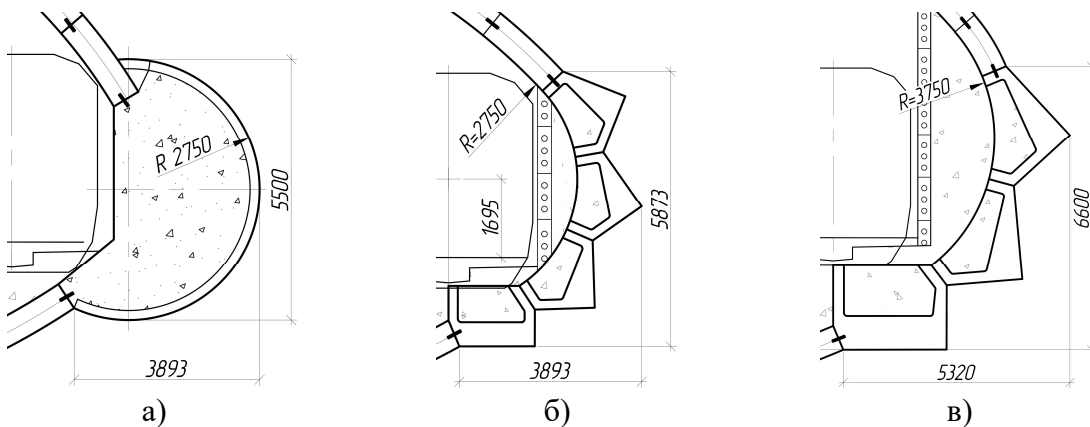


Рисунок 2. Конструкції станції

Проведені розрахунки з визначення об'ємів основних монтажних робіт для всієї станції з видозміненими несучими опорними елементами наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Об'єми основних будівельно-монтажних робіт по спорудженню станції згідно варіантів

№ п/п	Найменування	Одиниця виміру	Об'єм		
			Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
1	Монолітний бетон В25	м ³	24,5	—	—
2	Збірний залізобетон гладких блоків В35	м ³	13,9	12,2	13,3
3	Збірний залізобетон ребристих блоків В45	м ³	—	4,7	5,75
4	Розробка породи відбійними молотками (f=1)	м ³	54,0	68,3	126,6
5	Розробка породи (f=1) при прохідці механізованим комплексом	м ³	35,6	—	—
6	Розробка породи екскаватором (f=1)	м ³	73,8	81,0	65,0

На підставі техніко-економічного аналізу варіантів за укрупненими показниками, що подані в таблиці 1, прийнято за рекомендований варіант 3.

Конструктивні особливості третього варіанту припускають можливість пропуску механізованого прохідницького комплексу в порівнянні з першим і другим варіантами.

Висновки. При дослідженні питання конструктивних рішень станції метрополітену було проведено розрахунки будівельних конструкцій та порівняльну характеристику результатів ґрунтових деформацій результати яких наведені у викладеному вище матеріалі.

На підставі подальших розрахунків та техніко-економічного аналізу наведених варіантів на рисунку 1, на підставі отриманих укрупнених показників таблиці 1, було прийнято за рекомендований варіант 3.

Список використаних джерел

1. The 17 global goals. Unaited Nation. URL: <https://www.globalgoals.org/goals/> (Дата звернення: 05.03.2025р.).
2. Офіційний сайт "Київський метрополітен" / Розвиток метрополітену – важлива складова Стратегії розвитку міста Києва до 2025 року. Режим доступу: <http://metro.kyiv.ua/node/2222> (Дата звернення: 05.03.2025р.).
3. Офіційний сайт "Київський метрополітен" / Історія метро - від першої ідеї до першої черги. Режим доступу: <http://metro.kyiv.ua/node/110> (Дата звернення: 05.03.2025р.).
4. Айвазов Ю.М. Проектування метрополітенів. У 3-х частинах. Частина 1. Навчальний посібник / К.: НТУ, 2006. – 166 с.

References

1. The 17 global goals. Unaited Nation. URL: <https://www.globalgoals.org/goals/> (accessed at: 05.03.2025).
2. Ofitsiinyi sait "Kyivskyi metropoliten" / Rozvytok metropolitenu – vazhlyva skladova Stratehii rozvytku mista Kyieva do 2025 roku. URL: <http://metro.kyiv.ua/node/2222> (accessed at: 05.03.2025).
3. Ofitsiinyi sait "Kyivskyi metropoliten" / Istorii metro - vid pershoi idei do pershoi cherhy. URL: <http://metro.kyiv.ua/node/110> (accessed at: 05.03.2025).
4. Aivazov Yu.M. Proektuvannia metropoliteniv. U 3-kh chastynakh. Chastyna 1. Navchalnyi posibnyk / K.: NTU, 2006. – 166 s.

