

ІНТЕГРОВАНІ СТРАТЕГІЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ЕКОЛОГІЧНИМИ РИЗИКАМИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ КЛІМАТИЧНОЇ НЕЙТРАЛЬНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТІВ

Коцюбинський А. О., Линник Д. О., Грицуляк Г. М.,
Запухляк Н. М., Качала С. В., Фомічова О. В.
Івано-Франківський національний університет нафти і газу

Антропогенна зміна клімату є однією з найактуальніших глобальних проблем сучасності. Інтенсифікація промислового виробництва супроводжується зростанням обсягів викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря. Викиди парникових газів від промислових підприємств посилюють парниковий ефект, негативно впливаючи на кліматичну систему планети.

У статті представлено методологію формування інтегрованої стратегії зниження екологічних ризиків промислових об'єктів з метою досягнення їх кліматичної нейтральності. Дослідження базується на застосуванні системно-динамічного моделювання для прогнозування результативності впровадження комплексних технологічних

рішень у процесах декарбонізації виробництва. Математичне моделювання в умовах українського промислового сектору показало, що реалізація запропонованої стратегії дозволяє досягти суттєвого зменшення викидів парникових газів до 2048 року при показнику рентабельності інвестицій на рівні 25,8%.

Отримані результати підтверджують технічну та економічну доцільність декарбонізації українських промислових підприємств за умови системної впровадження розробленої комплексної стратегії.

Ключові слова: декарбонізація, викиди, забруднюючі речовини, промисловість, кліматична нейтральність, стратегія.

INTEGRATED STRATEGIES FOR DECARBONIZATION AND ENVIRONMENTAL RISK MANAGEMENT TO ENSURE CLIMATE NEUTRALITY OF INDUSTRIAL FACILITIES

Kotsyubynsky A. O., Lynnyk D. O., Hrytsulyak G. M.,
Zapukhliak N. M., Kachala S. V., Fomichova O. V.
Ivano-Frankivsk National University of Oil and Gas

Anthropogenic climate change is one of the most pressing global issues of our time. The intensification of industrial production is accompanied by an increase in the volume of pollutant emissions into the atmosphere. Greenhouse gas emissions from industrial enterprises exacerbate the greenhouse effect, negatively impacting the planet's climate system. The article presents a methodology for developing an integrated strategy to reduce the environmental risks of industrial facilities in order to achieve their climate neutrality. The study is based on the use of system-dynamic modeling to predict the effectiveness of implementing comprehensive technological solutions in the processes of decarbonization of production. Mathematical modeling in the Ukrainian industrial sector has shown that the implementation of the proposed strategy will allow for a significant reduction in greenhouse gas emissions by 2048 with a return on investment of 25.8%. The results confirm the technical and economic feasibility of decarbonizing Ukrainian industrial enterprises, provided that the developed comprehensive strategy is implemented systematically.

Keywords: *decarbonization, emissions, pollutants, industry, climate neutrality, strategy.*

Постановка проблеми

На фоні загальної екологічної кризи яскраво виділяється проблема зміни клімату. Підвищення глобальної температури порівняно з доіндустріальним періодом вже призводить до катастрофічних наслідків: екстремальні погодні явища завдають щорічних збитків, підвищення рівня моря загрожує прибережним територіям, а змі-

ни в кліматичних зонах руйнують екосистеми та загрожують продовольчій безпеці мільярдів людей. Промислові об'єкти є основними споживачами енергії та джерелами викидів забруднюючих речовин та стоять перед необхідністю комплексного переосмислення своїх виробничих процесів. Екологічні ризики, пов'язані з промисловою діяльністю, охоплюють широкий спектр впливів – від прямих викидів парникових газів до забруднення водних ресурсів, деградації ґрунтів та порушення екологічної рівноваги територій. Ці ризики не лише загрожують довкіллю, але й створюють значні фінансові, репутаційні та регуляторні виклики для підприємств.

Концепція кліматичної нейтральності передбачає досягнення балансу між викидами парникових газів та їх поглинанням чи компенсацією, що вимагає від промислових об'єктів впровадження інноваційних технологій, оптимізації енергоспоживання та кардинальної зміни бізнес-моделей.

Перехід до кліматично нейтрального виробництва не є лише екологічним імперативом, а й стратегічною необхідністю для забезпечення довгострокової конкурентоспроможності підприємств в умовах посилення екологічного регулювання та зростання споживчих вимог до екологічності продукції. У цьому контексті розробка та впровадження ефективних стратегій декарбонізації та мінімізації екологічних ризиків стає критично важливою для забезпечення сталого майбутнього як для окремих підприємств, так і для людства загалом. Комплексний підхід до вирішення цих викликів вимагає інтеграції технологічних інновацій, управлінських рішень та економічних механізмів. Успішна трансформація промислових

об'єктів може стати переломним моментом у боротьбі зі зміною клімату та забезпечити основу для створення вуглецево-нейтральної економіки майбутнього.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Людська діяльність спричинила значні трансформації глобальної кліматичної системи, що пов'язано з порушенням природної рівноваги та інтенсивним накопиченням парникових газів в атмосферному повітрі. До найбільш значущих парникових газів належать водяна пара, двоокис вуглецю, метан, озон та перфторвуглецеві сполуки. Результатом посилення парникового ефекту стало прогресуюче підвищення середньо планетарної температури та зростання вмісту CO₂ в атмосфері понад рівень 400 ppm [1,4].

Парникові гази, зокрема діоксид вуглецю (CO₂), метан (CH₄) та закис азоту (N₂O), характеризуються здатністю до поглинання та утримання теплової енергії у межах атмосферного шару Землі. Механізм парникового ефекту реалізується через процеси абсорбції та повторного випромінювання довгохвильової інфрачервоної радіації цими газоподібними речовинами. Така взаємодія з тепловим випромінюванням зумовлена особливостями молекулярної структури CO₂, CH₄ та N₂O, які дозволяють цим сполукам взаємодіяти з електромагнітним випромінюванням у специфічних спектральних областях. Основним антропогенним фактором емісії діоксиду вуглецю є спалювання викопного палива – вугілля, нафти та природного газу – у секторах енергетики, промислового виробництва та транспортної галузі [3,5,7].

Глобальна індустріалізація та надмірна залежність від невідновлюваних джерел енергії призвели зміни клімату, що вимагає стратегій впровадження циркулярної економіки в усіх секторах, щоб скоротити викиди вуглецю [9]. В різних країнах зростає кількість досліджень та політик, спрямованих на пошук та впровадження стратегій вирішення проблем зміни клімату. Країнами з найбільшою кількістю досліджень у цій галузі є Китай, Індія, Сполучені Штати, Велика Британія та Австралія [1].

Глобальна стратегія протидії промислового забрудненню базується на комплексній модерні-

зації виробничих процесів з орієнтацією на екологічну сумісність та зниження рівня шкідливих викидів. Ефективність такого підходу досягається через комплексний моніторинг потенційних забруднювачів та імплементацію превентивних механізмів, спрямованих на мінімізацію екологічного навантаження. Ключовими напрямками цієї трансформації є розвиток екологічно чистих виробничих методологій, зменшення кількості використання шкідливих хімічних сполук та впровадження безвідходних технологічних циклів, що забезпечують скорочення промислових забруднень [6]. Також до основних аспектів досягнення нульових викидів парникових газів, належать ефективність кінцевого використання та електрифікацію, постачання чистої електроенергії, постачання чистого палива, «уловлювання, зберігання та використання парникових газів», покращення поглинання земельними ресурсами, скорочення викидів, відмінних від CO₂ [2].

Уловлювання та зберігання вуглецю в енергетичній промисловості вимагають наукових та технологічних інновацій. Полігенерація, хімічне циклічне спалювання та технології, що поєднують викопне паливо та відновлювані джерела енергії для уловлювання CO₂ є новим етапом для виробництва. Перетворення CO₂ на паливо та хімічні речовини є перспективною є перспективним напрямком для підприємств. Технічні методи уловлювання CO₂ включають уловлювання після згоряння, уловлювання перед згорянням та киснево-паливне спалювання. Уловлювання після згоряння відділяє CO₂ від відпрацьованого газу та є одним із найпростіших способів рекуперації CO₂ в енергетичних системах. Методологія розділення газів, що використовуються в технології уловлювання після згоряння, включає фізичну хімічну абсорбцію, абсорбцію, мембранне розділення. Завдяки великій кількості обробки димових газів після згоряння та низькій концентрації CO₂, метод хімічної абсорбції є найбільш придатною технологією розділення для уловлювання CO₂ після згоряння. Перевагою уловлювання після згоряння є те, що його легко експлуатувати [8]. Проте, технології вловлювання вуглецю на промислових об'єктах є має бути лише елементом комплексної стратегії мінімізації викидів парникових газів.

Технологічні інновації та структурна трансформація промисловості чинять суттєвий вплив

на рівень вуглецевих викидів у виробничих процесах, демонструючи значні синергетичні ефекти при їх взаємодії. Оптимізація промислової структури може ефективно зменшити викиди парникових газів, причому модернізація виробничої структури демонструє більш значний гальмівний ефект, ніж раціоналізація. Водночас, ізольовані технологічні трансформації або їх взаємодія з оптимізацією промислової структури не генерують суттєвого скорочення викидів вуглецю. Проте, інтеграція технологічних змін з комплексною модернізацією промислової структури створює потужний синергетичний ефект, що призводить до значного гальмування процесів вуглецевих викидів [10]. Звідси необхідною є розробка та впровадження комплексної стратегії мінімізації промислових викидів для досягнення кліматичної нейтральності.

Визначення цілей статті (постановка завдання)

Метою дослідження є розробка комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків промислових об'єктів для досягнення кліматичної нейтральності на основі системно-динамічного моделювання та прогнозування ефективності інтегрованих технологічних рішень в умовах українського промислового сектору.

Завдання дослідження:

- 1) Провести аналіз існуючих стратегій декарбонізації промисловості та оцінити їх ефективність;
- 2) Розробити три етапну комплексну стратегію мінімізації екологічних ризиків з поетапним впровадженням;
- 3) Створити прогнозну модель зниження викидів CO₂ для комплексної стратегії зниження екологічних ризиків на період до 2050 року.

Виклад основного матеріалу дослідження

Для розробки та прогнозування ефективності комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків для досягнення кліматичної нейтральності було використано системно-динамічний підхід. За вихідні данні було взято показники по викидам промислового сектору України станом на 2024 рік. Прогнозне моделювання базувалось на математичних функціях експоненціального та логістичного зростання/спадання. Економічна складова моделювалась через аналіз вартості життєвого циклу (LCC - Life Cycle Cost) кожної технології. Для врахування невизначеностей використовувались елементи стохастичного моделювання.

У ході аналізу було виділено ключові стратегії мінімізації промислових екологічних ризиків для досягнення вуглецевої нейтральності (таблиця 1).

Таблиця 1

Ключові стратегії мінімізації промислових екологічних ризиків

Стратегія	Опис	Потенціал зниження викидів	Термін окупності	Ризики
Енергоефективність	Модернізація обладнання, оптимізація процесів, впровадження систем управління енергією	15–30%	2–5 років	Технологічне застарівання
Перехід на відновлювані джерела енергії	Встановлення сонячних панелей, вітрогенераторів, закупівля «зеленої» електроенергії	40–70%	7–15 років	Складність поставок, залежність від погоди
Електрифікація процесів	Заміна газових/вугільних технологій на електричні	30–60%	5–10 років	Підвищене навантаження на енергосистему

Стратегія	Опис	Потенціал зниження викидів	Термін окупності	Ризики
Циркулярна економіка	Переробка відходів, повторне використання матеріалів, замкнуті цикли	20–40%	3–8 років	Якість вторинних матеріалів
Вуглецеве уловлювання (CCS/CCU)	Технології захоплення, використання та зберігання CO ₂	80–95%	10–20 років	Технологічна незрілість, високі операційні витрати
Заміна сировини	Використання біоматеріалів, синтетичних альтернатив з нижчим вуглецевим слідом	25–50%	3–7 років	Доступність альтернатив, якість продукції
Водневі технології	Використання зеленого водню в енергоємних процесах	60–90%	15–25 років	Інфраструктура, безпека, економічна життєздатність

Згідно таблиці 1 найбільш помітною особливістю є обернена кореляція між потенціалом зниження викидів та доступністю технологій. Вуглецеве уловлювання та водневі технології по-

казують найвищий потенціал зниження викидів (80-95% та 60-90% відповідно), але мають найдовші терміни окупності (10-25 років) та найвищі ризики. Натомість енергоефективність, хоча й



Рисунок 1. Елементи та етапи впровадження комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків

*Джерело: розроблено авторами

забезпечує лише 15-30% зниження викидів, окупається за 2-5 років з мінімальними ризиками. Це створює стратегічну дилему для підприємств: чи інвестувати в швидкі, але менш ефективні рішення, чи фокусуватися на довгострокових проривних технологіях з невизначеними результатами. Таблиця демонструє, що не існує універсального рішення для декарбонізації промисловості. Успішна стратегія повинна комбінувати кілька підходів з урахуванням специфіки підприємства, фінансових можливостей та часових рамок. Звідси, розробка та впровадження комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків є найбільш актуальним та економічно доцільним напрямком розвитку підприємств. На рисунку 1 наведено етапи запровадження комплексної стратегії мінімізації екологічних ризиків від промисловості для досягнення кліматичної нейтральності.

Комплексна стратегія базується на три етапному підході до декарбонізації промислового виробництва з інтеграцією технологічних, економічних та організаційних рішень. Стратегія спрямована на досягнення кліматичної нейтральності через послідовне впровадження від простих енергоефективних рішень до технологій уловлювання вуглецю. На рисунку 2 продемонстровано порівняння ефективності традиційної та комплексно.

На рисунк 2 відображено, що традиційна стратегія показує поступове зниження викидів з 48 млн тон CO₂ у 2024 році до приблизно 35 млн тонн у 2050 році, що становить лише 30% загального зниження за 26 років.

Натомість комплексної стратегія демонструє радикально іншу траєкторію з трьома виразними фазами: помірне зниження до 30 млн тон у 2027 році завдяки швидким перемогам, різке прискорення до 5 млн тон у 2035 році через структурні зміни, та практично повну декарбонізацію до менше ніж 1 млн тон до 2050 року завдяки проривним технологіям.

Зелені стовпці ілюструють паралельне зростання частки відновлюваної енергії з 15% до 45%, підкреслюючи синергетичний ефект інтегрованого підходу.

Досягнення кліматичної нейтральності вимагає системної трансформації – традиційні методи забезпечують стабільне, але недостатнє зниження викидів, тоді як комплексна стратегія, попри більші початкові інвестиції, досягає ефекту з практично повною декарбонізацією (98% зниження) до 2048 року.

Комплексна стратегія мінімізації промислових ризиків демонструє кардинальну різницю в економічній ефективності від традиційного підходу.



Рисунок 2. Порівняння ефективності стратегій: Викиди CO₂

*Джерело: розроблено авторами



Рисунок 3. Повернення інвестицій

*Джерело: розроблено авторами

На рисунку 3 відображена динаміка повернення інвестицій. Традиційна стратегія показує повільне лінійне зростання ROI від 2.1% у 2027 році до максимальних 5,2% у 2050 році, що свідчить про обмежений потенціал економічного повернення. Натомість комплексна стратегія демонструє експоненціальне зростання – від 4.8% у 2027 році (вдвічі вище за традиційну) до вражаючих 25.8% у 2050 році, що в п'ять разів перевищує традиційний підхід.

Особливо помітним є синергетичний ефект після 2030 року, коли ROI комплексної стратегії різко прискорюється завдяки накопиченій економії від енергоефективності, відновлюваних джерел енергії та зниження витрат на вуглецеві викиди.

Попри значно вищі початкові капіталовкладення, комплексна стратегія забезпечує кардинально кращу довгострокову прибутковість та економічну стійкість, роблячи її єдиним раціональним вибором для досягнення кліматичної нейтральності України.

Висновки та перспективи подальших досліджень

Зміна клімату є серйозною проблемою сьогодення. Декарбонізація та мінімізація екологічних ризиків промисловості для досягнення кліматичної нейтральності є необхідним кроком для зменшення антропогенного навантаження на довкілля. У ході аналізу існуючих стратегій декарбонізації було виявлено взаємозв'язок між потенціалом

зниження викидів та доступністю технологій. Ця закономірність підтверджує необхідність інтегрованого підходу, що поєднує швидкокоупні рішення з довгостроковими проривними технологіями.

У ході роботи розроблено три етапна комплексна стратегію мінімізації екологічних ризиків промислового сектору, зокрема у сфері викидів. Розроблена стратегія забезпечує оптимальну послідовність впровадження технологій декарбонізації з максимізацією синергетичних ефектів. Перша фаза (2024-2027) прогнозовано забезпечить 25-35% зниження викидів. Друга фаза (2027-2035) включає структурні зміни через масштабне впровадження відновлюваної енергії та електрифікацію процесів, досягне 55-70% зниження викидів. Третя фаза (2035-2050) передбачає впровадження CS/CCU та водневих систем для досягнення практично повної декарбонізації (85-100% зниження викидів).

Прогнозне моделювання на основі українських умов демонструє різницю між традиційним та комплексним підходами до декарбонізації. Традиційна стратегія забезпечує лише 30% зниження викидів до 2050 року, що недостатньо для досягнення кліматичних цілей. Натомість комплексна стратегія досягає 98% зниження викидів з практично повною декарбонізацією до 2048 року.

Розроблена стратегія адаптована до українських умов післявоєнного відновлення та може бути інтегрована в національні програми зеленої трансформації. Результати дослідження підтверджують можливість досягнення кліматичної

нейтральності українськими промисловими об'єктами до 2050 року за умови системного впровадження комплексної стратегії з достатнім фінансуванням та політичною підтримкою.

Список використаної літератури

1. Hsieh, YL., Yeh, SC. The trends of major issues connecting climate change and the sustainable development goals. *Discov Sustain* 5, 31 (2024). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00183-9>
2. Laharish Guntuka, Prabhjot S. Mukandwal, Emel Aktas, Vamsi Sai Krishna Paluvadi; From carbon-neutral to climate-neutral supply chains: a multidisciplinary review and research agenda. *The International Journal of Logistics Management* 30 April 2024; 35 (3): 916–942. <https://doi.org/10.1108/IJLM-03-2023-0116>
3. Lynnyk, D. O., & Hrytsuliak, G. M. (2023). Analysis of the state of atmospheric air in the city of Ivano-Frankivsk. In 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment (Vol. 2023, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520140>
4. Mikhaylov, A., Moiseev, N., Aleshin, K., & Burkhardt, T. (2020). Global climate change and greenhouse effect. *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, 7(4), 2897. [http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4\(21\)](http://doi.org/10.9770/jesi.2020.7.4(21))
5. NASA Global Climate Change and Global Warming. (2025). Global surface temperature. NASA's Jet Propulsion Laboratory. <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/?intent=121>
6. Prince U, Ewuzie U, Onwuka C. *Environmental pollution: causes, effects, and the remedies*. Amsterdam: Elsevier; 2020. p. 419–29. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819001-2.00021-8>
7. Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. (2024). Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of The Total Environment*, 935, 173359. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173359>
8. Wang, F., Harindintwali, J. D., Yuan, Z., Wang, M., Wang, F., Li, S., ... & Chen, J. M. (2021). Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality. *The innovation*, 2(4). DOI: 10.1016/j.xinn.2021.100180
9. Yang, M., Chen, L., Wang, J. et al. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environ Chem Lett* 21, 55–80 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>
10. You, J., Zhang, W., Lin, W. et al. The impact of technological progress and industrial structure optimization on manufacturing carbon emissions: a new perspective based on interaction. *Environ Dev Sustain* 27, 16205–16236 (2025). <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04531-7>