УДК 504.054:621.311
DOI https://doi.org/10.32846/2306-9716/2026.eco.5-68.9

ОЦІНКА ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНІЧНОГО РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ВИКИДІВ ОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ У ВИКИДНИХ ГАЗАХ

Михайлюк Ю.Д. (orcid.org/0000-0003-2448-3847),
Давидчук Д. В. (orcid.org/0009-0007-8038-5375)
Івано-Франківський національний технічний університету нафти і газу
вул. Карпатська 15, м. Івано-Франківськ
yuliia.mykhailiuk@nung.edu.ua, dariia.davydchuk-eko231@nung.edu.ua

У статті проведено комплексну оцінку екологічної ефективності нового технічного рішення, спрямованого на зниження вмісту токсичного оксиду вуглецю (*CO)* у викидних газах компресорних установок. Забруднення атмосферного повітря продуктами неповного згоряння палива залишається гострою екологічною проблемою для урбанізованих територій і промислових зон з високою концентрацією енергетичного обладнання. Традиційні каталітичні та плазмокаталітичні методи очищення мають суттєві обмеження, пов'язані з високою чутливістю каталізаторів до складу газів, їх термічною деградацією, а також значними енергетичними витратами на генерацію плазми в усьому об'ємі відхідних газів.

Запропонований у роботі альтернативний підхід базується на процесах гомогенного безкаталітичного доокислення молекул оксиду вуглецю до значно менш токсичного діоксиду вуглецю *(CO_2)* шляхом введення активованого повітряного потоку безпосередньо у викидний тракт компресорної установки. Повітря піддається попередньому іонізаційному впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання, що забезпечує генерацію активних форм кисню та радикалів *(O, O_3, OH)*. Завдяки підвищеній реакційній здатності цих частинок, процеси ланцюгового окиснення інтенсифікуються без застосування твердих каталітичних систем, що дозволяє реалізувати екозахисний процес за відносно помірних температур газового середовища та мінімізувати експлуатаційні витрати.

У ході дослідження детально проаналізовано кінетику радикальних реакцій та систематизовано основні групи екологічних і газодинамічних факторів, які безпосередньо впливають на стабільність і сумарний екологічний ефект очищення. Доведено, що перетворення токсичного *CO* на CO_2 є екологічно обґрунтованим компромісом у межах задач охорони атмосферного повітря через значно нижчу токсичність діоксиду вуглецю та зниження локального екотоксичного навантаження біля промислових майданчиків. Запропоноване рішення конструктивно адаптаційне і може бути легко інтегроване в існуючі викидні системи без суттєвої зміни їхньої геометрії. *Ключові слова:* компресорні установки, іонізація повітря, охорона атмосферного повітря, активні форми кисню, екологічна безпека.

Assessment of environmental effectiveness of a technical solution for reducing carbon monoxide emissions in exhaust gases. Mykhailiuk Yu., Davydchuk D.

The paper provides a comprehensive assessment of the environmental efficiency of a new technical solution aimed at reducing the content of toxic carbon monoxide *(CO)* in the exhaust gases of compressor units. Atmospheric pollution by products of incomplete fuel combustion remains a severe environmental hazard for urbanized areas and industrial zones with a high concentration of energy equipment. Traditional catalytic and plasma-catalytic treatment methods have significant limitations related to the high sensitivity of catalysts to the gas composition, their thermal degradation, and substantial energy consumption required for plasma generation within the entire volume of exhaust gases.

The alternative approach proposed in the study is based on the processes of homogeneous non-catalytic post-oxidation of carbon monoxide molecules to significantly less toxic carbon dioxide *(CO_2)* by introducing an activated air stream directly into the exhaust duct of the compressor unit. The air flow is exposed to the preliminary ionizing effect of hard ultraviolet radiation, which ensures the generation of reactive oxygen species and radicals *(O, O_3, OH)*. Due to the increased reactivity of these particles, the chain oxidation processes are intensified without the use of solid catalytic systems. This allows the eco-protective process to be implemented at relatively moderate gas medium temperatures and minimizes operating costs.

In the course of the research, the kinetics of radical reactions were analyzed in detail, and the main groups of environmental and gas-dynamic factors that directly affect the stability and total environmental effect of the purification process were systematized. It is proved that the conversion of toxic *CO* into CO_2 is an environmentally justified compromise within the framework of atmospheric air protection tasks due to the significantly lower toxicity of carbon dioxide and the reduction of local ecotoxic load near industrial sites. The proposed solution is structurally adaptive and can be easily integrated into existing exhaust systems without significant changes to their geometry. *Key words:* compressor units, air ionization, atmospheric protection, reactive oxygen species, environmental safety.

© Михайлюк Ю.Д., Давидчук Д. В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу CC BY 4.0

Постановка проблеми. Забруднення атмосферного повітря продуктами неповного згоряння палива залишається гострою екологічною проблемою для урбанізованих територій і зон з концентрацією енергетичних та компресорних установок. Оксид вуглецю *(CO)* є одним із найбільш небезпечних компонентів викидних газів, оскільки характеризується високою токсичністю та здатністю негативно впливати на стан здоров'я людини навіть за відносно невеликих концентрацій. У зв'язку з цим мінімізація антропогенного навантаження на атмосферу вимагає пошуку нових екологічно безпечних підходів до знешкодження цього полютанта.

Актуальність дослідження. Сучасні світові тенденції та дослідження [1] підтверджують значущу роль *CO* у формуванні ризиків для здоров'я населення та екологічної безпеки атмосферного повітря. Потреба в оптимізації екологічних показників промислових об'єктів в умовах жорсткіших нормативних вимог зумовлює необхідність розвитку і вдосконалення технологій перетворення *CO* у менш токсичні сполуки без значних додаткових витрат енергоресурсів, що робить тему даного дослідження вкрай нагальною.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Практична необхідність зменшення викидів оксиду вуглецю пов'язана із виконанням завдань охорони навколишнього природного середовища та екологічної безпеки промислових зон. Дана робота спрямована на вирішення науково-практичного завдання щодо оцінки екологічної ефективності конкретних технічних рішень для очищення відхідних газів компресорних установок від *CO,* що базуються на іонізації повітря та ініціації процесів доокислення оксиду вуглецю [2], розроблених на базі Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасних наукових дослідженнях приділяється значна увага зменшенню викидів *CO*. Зокрема, у роботі [1] наведено результати моделювання викидів *CO* та *NOx* для газотурбінних установок, що підтверджує складність прогнозування концентрацій забруднювачів.

Найбільш поширеним напрямом залишається каталітичне окиснення. У роботі [3] представлено огляд сучасних каталізаторів на основі оксидів металів, а у дослідженні [4] показано перспективність використання комбінованих металоксидних систем для розширення температурного діапазону їх роботи.

Альтернативним напрямом є використання плазмохімічних і плазмокаталітичних методів. У роботі [5] узагальнено досягнення у сфері плазмокаталізу та показано синергетичний ефект поєднання плазми з каталітичними матеріалами. Дослідження [6] демонструє ефективність нетермічної плазми у поєднанні з каталізаторами для окиснення *CO* за відносно низьких температур, а у роботі [7] розглядаються процеси конверсії газів у межах циркулярної економіки. Водночас у зазначених роботах наголошується на обмеженнях методів: чутливості каталізаторів до складу газів та високих енергетичних витратах.

Перспективним вектором розвитку безкаталітичних екозахисних технологій є дослідження фотохімічних процесів. Так, у праці [8] детально вивчено кінетичне моделювання гомогенного окиснення оксиду вуглецю в газових потоках, що підтверджує високу швидкість взаємодії компонентів за наявності активних центрів. Механізми генерування вільних радикалів під дією жорсткого ультрафіолетового випромінювання для деструкції газових забруднювачів атмосфери екологічно обґрунтовано у дослідженні [9]. Крім того, комплексний аналіз інженерних рішень для зниження екологічного сліду газотранспортної інфраструктури, зокрема на компресорних станціях, наведено у роботі [10], де підкреслено пріоритетність впровадження локальних систем очищення відхідних газів.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість досліджень, у низці робіт [5–7] зазначається, що впровадження плазмокаталітичних систем у промислові установки потребує подальшого обґрунтування їх екологічної доцільності та адаптації до конкретних умов. Недостатньо висвітленими залишаються питання застосування іонізаційних методів безпосередньо у викидних трактах компресорних та енергетичних установок. В науковій літературі обмежено представлено результати оцінки екологічної ефективності технічних рішень, які базуються на іонізації повітря без суттєвого ускладнення конструкції установки [7], що й зумовило виконання цього дослідження.

Новизна. Наукова новизна роботи полягає в обґрунтуванні механізму зменшення концентрації оксиду вуглецю у викидних трактах компресорних установок за рахунок безкаталітичного доокислення за допомогою активних форм кисню, отриманих шляхом ультрафіолетової іонізації повітря. Вперше комплексно систематизовано екологічні чинники (параметри іонізації, витрати, режими роботи установки), які безпосередньо формують сумарний екологічний ефект процесу перетворення *CO* до CO_2 безпосередньо у швидкісному газовому потоці.

Методологічне або загальнонаукове значення. Методологічне значення дослідження полягає у формуванні комплексного підходу до оцінювання ефективності процесів очищення викидних газів, що передбачає одночасне врахування як хімічних аспектів перетворення токсичних компонентів (кінетики окиснення), так і експлуатаційних (газодинамічних та конструктивних) характеристик промислового обладнання. Це дозволяє розширити методологічну базу екологічного моніторингу та проектування екозахисних систем.

Викладення основного матеріалу. Зменшення вмісту оксиду вуглецю *(CO)* у викидних газах

є складним науково-технічним завданням, що потребує врахування як кінетики хімічних процесів окиснення, так і специфіки формування газодинамічних потоків у викидних трактах компресорних установок. Як свідчать результати сучасних досліджень, ефективність перетворення *CO* значною мірою залежить від наявності активних окиснювальних агентів та умов їх гомогенної взаємодії з компонентами викидних газів [5–7].

Запропонований у роботі підхід [2] ґрунтується на концепції штучної інтенсифікації окиснювальних процесів шляхом контрольованої подачі іонізованого повітря безпосередньо у викидний тракт компресорної установки. Повітряний потік з навколишнього середовища спрямовується до іонізаційного блока, де піддається інтенсивному впливу жорсткого ультрафіолетового випромінювання (УФ) певного спектрального діапазону.

Під дією квантів світла *(hv)* відбувається фотодисоціація молекулярного кисню, що міститься в повітрі, з утворенням високореакційних вільних радикалів та активних форм кисню (АФК). Основними первинними реакціями в зоні іонізації є:

$$O_2 + hv \rightarrow O(1D) + O(3P)$$
$$O_2 + O(3P) + M \rightarrow O_3 + M,$$

де *O(1D)* та *O(3P)* відповідно синглетний (збуджений) та триплетний (основними) стани атомарного кисню; *M* – третя частинка (наприклад, молекула азоту N_2 або інший інертний компонент повітря), яка поглинає надлишок енергії під час потрійного зіткнення.

Наявність у потоці вологи (парів води) призводить до додаткового генерування гідроксильних радикалів *(OH)*, які характеризуються надзвичайно високим окиснювальним потенціалом:

$$O(1D) + H_2O \rightarrow 2OH$$

Після виходу з іонізаційного блока активована газоповітряна суміш, насичена озоном (O_3) та атомарними радикалами кисню, впорскується через спеціальну систему форсунок у викидний тракт. На етапі змішування іонізованого повітря з відпрацьованими газами компресорної установки ініціюється ланцюгова реакція доокислення оксиду вуглецю до діоксиду вуглецю (CO_2). Головними хімічними маршрутами цього процесу є:

$$CO + O \rightarrow CO_2$$
$$CO + O_3 \rightarrow CO_2 + O_2$$
$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$$
$$H + O_2 \rightarrow OH + O$$

Завдяки високій реакційній здатності генерованих радикалів, константи швидкості цих реакцій є на кілька порядків вищими порівняно зі звичайним молекулярним окисненням киснем повітря. Це дозволяє ефективно проводити доокислення *CO* за помірних температур газового середовища (без потреби додаткового підігріву відхідних газів), що суттєво підвищує загальну енергоефективність екозахисної системи. Окрім цього, безкаталітичний характер процесу усуває ризики отруєння чи деградації активної поверхні, які є критичними для традиційних металоксидних систем у реальних промислових умовах.

Запропоноване технічне рішення конструктивно адаптаційне: іонізаційний модуль інтегрується у існуючі системи відведення газів без кардинального втручання в геометрію тракту та режим роботи компресора. Проте сумарна екологічна ефективність системи очищення не є константною і визначається балансом низки чинників, які систематизовано в табл. 1.

З фізико-хімічної та аеродинамічної точок зору ключовим обмеженням системи є час контакту *(τ)* між активними радикалами та молекулами *CO*. Швидкість руху відхідних газів у викидних трактах компресорних установок є досить високою, а лінійні розміри зони реакції обмежені. Оскільки час життя вільних атомів кисню та радикалів є дуже малим (через процеси рекомбінації), архітектура системи форсунок повинна забезпечувати миттєву дифузію іонізованого потоку в основний об'єм газу для максимізації ймовірності ефективних зіткнень частинок.

Екологічний ефект впровадження розробленого методу полягає у суттєвому зниженні екотоксичного навантаження. З позицій екологічної безпеки, заміна

Таблиця 1

Фактори, що визначають екологічну ефективність зменшення вмісту *CO* у викидних газах

Група факторів	Характеристика впливу	Екологічне значення
Параметри іонізації повітря	Визначають інтенсивність утворення активних форм кисню *(O, O_3, OH)*	Забезпечують умови для високошвидкісного доокислення *CO*
Витрата іонізованого повітря	Впливає на якість та ступінь гомогенного змішування з викидними газами	Сприяє зниженню локальної концентрації *(CO)* у загальному потоці
Концентрація *CO* у викидних газах	Характеризує початковий рівень забруднення середовища	Визначає потенціал і граничні межі екологічного ефекту очищення
Температурний режим газового потоку	Впливає на константи швидкості радикальних реакцій	Забезпечує оптимальну кінетику без додаткових витрат палива
Режим роботи компресорної установки	Обумовлює динамічну змінність складу та витрати газів	Визначає стабільність екологічного ефекту в часі

високотоксичного *CO* (ГДК якого в атмосферному повітрі є жорстко обмеженою) на діоксид вуглецю CO_2, попри його парникову природу, є повністю обґрунтованим компромісом. Локальне зниження концентрації чадного газу біля промислових майданчиків дозволяє радикально мінімізувати ризики для здоров'я населення та покращити загальний стан приземного шару атмосфери в зоні впливу компресорних станцій.

Порівняно з плазмокаталітичними комплексами [5, 6], де плазма генерується безпосередньо всередині всього об'єму очищуваного газу (що вимагає великих енергетичних витрат і складних реакторів), використання винесеного УФ-іонізатора повітря є набагато простішим та економічно вигіднішим рішенням, адаптованим до умов реальної промислової експлуатації.

Головні висновки

1. У ході проведеного дослідження досягнуто поставленої мети, що полягала в оцінці екологічної ефективності технічного рішення, спрямованого на зменшення вмісту оксиду вуглецю у викидних газах компресорних установок шляхом іонізації повітря та ініціації процесів доокислення *CO*.

2. Встановлено, що використання іонізованого повітря створює сприятливі умови для інтенсифікації процесів окиснення оксиду вуглецю до діоксиду вуглецю без застосування традиційних каталітичних систем, що дозволяє уникнути обмежень, пов'язаних із деградацією каталізаторів.

3. Показано, що запропоноване технічне рішення може бути інтегроване у існуючі викидні тракти компресорних установок без суттєвого втручання у їх конструкцію. Реалізація процесу іонізації не потребує значного підвищення температури газового середовища, що є важливим з погляду енергоефективності.

4. Доведено, що екологічний ефект від застосування розглянутого підходу полягає у зниженні концентрації оксиду вуглецю як одного з найбільш токсичних компонентів викидних газів, що сприяє зменшенню негативного токсичного навантаження на атмосферне повітря в зонах розміщення компресорної інфраструктури.

Перспективи використання результатів дослідження

Перспективи подальших досліджень у даному напрямі пов'язані з проведенням кількісної оцінки ефективності зменшення вмісту оксиду вуглецю за різних режимів роботи компресорних установок, а також з оптимізацією параметрів процесу іонізації повітря. Практична цінність результатів полягає у можливості їх використання під час модернізації систем очищення відхідних газів компресорних станцій магістральних газопроводів та промислових підприємств з метою зниження плати за викиди та покращення екологічного стану прилеглих територій.

Література

1. Coelho L. dos S., Ayala H. V. H., Mariani V. C. CO and NOx emissions prediction in gas turbine using a novel modeling pipeline based on the combination of deep forest regressor and feature engineering. *Fuel*. 2024. Vol. 357. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129366.
2. Михайлюк Ю. Д. Спосіб очистки відхідних газів компресорних установок від CO: пат. 102157 Україна: МПК B01J 38/00, C10K 1/00. № u201413739; заявл. 22.12.2014; опубл. 26.10.2015, Бюл. № 20.
3. Dey S. Oxidation of carbon monoxide over various nickel oxide catalysts in different conditions: A review. *Cleaner Engineering and Technology*. 2020. Vol. 1. DOI: 10.1016/j.ceja.2020.100008.
4. Zheng Y., Zhou H., Su W., Xing Y. Progress in metal oxide catalysts for carbon monoxide oxidation. *Catalysts*. 2026. Vol. 16, № 1. DOI: 10.3390/catal16010007.
5. Yan C., Zhu X., Li Y., Tu X. Recent advances in plasma catalysis. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2022. Vol. 126, № 23. DOI: 10.1021/acs.jpcc.2c03062.
6. Zhang J., Liu Y., Wang Z. et al. Nonthermal plasma-assisted catalytic oxidation of carbon monoxide over CuOx@γ-Al2O3. *The Journal of Physical Chemistry C*. 2019. Vol. 123, № 15. DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b03010.
7. Mukhtar A., Saqib S., Mohotti D. et al. Non-thermal plasma-catalytic processes for CO2 conversion toward circular economy: fundamentals, current status, and future challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2025. Vol. 32, № 48. DOI: 10.1007/s11356-024-34751-3.
8. Gurgel F. M., Santos J. C., Sousa J. A. Kinetic modeling of carbon monoxide low-temperature homogeneous oxidation in gas-phase reactions. *Chemical Engineering Journal*. 2024. Vol. 481. DOI: 10.1016/j.cej.2023.147852.
9. Wang Y., Chen T., Zhang L. et al. UV-induced reactive oxygen species generation and radical processes for the degradation of atmospheric pollutants. *Environmental Science & Technology*. 2024. Vol. 58, № 11. DOI: 10.1021/acs.est.3c09121.
10. Blumberg T., Tsatsaronis G. Mitigation of the environmental footprint of natural gas compressor stations: A thermodynamic and environmental assessment. *Energy*. 2024. Vol. 290. DOI: 10.1016/j.energy.2023.130112.

Дата першого надходження статті до видання: 16.07.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 18.09.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 09.11.2026