

Олена Маляренко^{1*}, канд. техн. наук, ст. наук. співр., <https://orcid.org/0000-0001-5882-916X>

Віталій Горський¹, д-р філософії (PhD), <https://orcid.org/0000-0001-9128-9556>

Наталія Іваненко¹, канд. техн. наук, ст. досл., <https://orcid.org/0000-0001-5438-1556>

Тетяна Євтухова^{1,2}, канд. техн. наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0003-4778-2479>

Дмитро Матушкін¹, д-р філософії (PhD), <https://orcid.org/0000-0003-4431-7862>

¹Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, Київ, 03150, Україна;

²Міжрегіональна академія управління персоналом, вул. Фрометівська, 2, Київ, 03039, Україна

*Автор-кореспондент: malyarenlena@gmail.com

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЗАХОДІВ ЗІ ЗНИЖЕННЯ ВИКИДІВ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ

Анотація. У статті розглянуто міжнародні екологічні зобов'язання, що взяла на себе Україна стосовно зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу, зокрема викидів пилу, оксидів сірки та оксидів азоту. Проаналізовано обсяги споживання енергоресурсів та обсяги викидів забруднюючих речовин за секціями економіки. Визначено, що найбільшим джерелом викидів забруднюючих речовин є промисловий сектор, в якому лідерство за обсягами викидів та енергоспоживання посідають переробна промисловість та постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря. Виділено три основні групи заходів, що сприяють зниженню викидів забруднюючих речовин в атмосферу: підвищення енергоефективності й енергозбереження, що сприяють економії палива; заміщення видів палива з більшими обсягами викидів на палива з меншими обсягами або відновлюваними джерелами енергії та методи знешкодження викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Запропоновано комплексну оцінку природоохоронних заходів, в якій враховано ефективність заходів не лише від отриманої економії органічного палива, а й суто природоохоронних заходів (очищення відхідних газів від викидів забруднюючих речовин), що дозволяють досягти зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Запропонована комплексна оцінка призначена для відбору ефективних технологій, що сприятимуть зниженню викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Методологія комплексної оцінки включає екологічні показники, які мають відповідати граничним нормам згідно з прийнятим зобов'язанням; економічні показники, що включають вартість зекономленого палива або додаткового очисного обладнання і заходів зі зниження викидів та енергетичні показники: зниження обсягів спожитого палива й оцінку додаткової витрати електроенергії на роботу очисного обладнання. Порівняння можливих варіантів впровадження заходів пропонується проводити за критерієм мінімуму витрат. Оригінальність методичного підходу запропонованої оцінки полягає в його універсальності, можливості застосування для оцінки заходів на різних ієрархічних рівнях економіки: країна, вид економічної діяльності, установка.

Ключові слова: викиди забруднюючих речовин, види економічної діяльності, енергозбереження, оцінка природоохоронних заходів.

1. Вступ

Викиди забруднюючих речовин (ЗР) є значною проблемою у світі, вони сприяють утворенню кислотних дощів, призводять до захворювань дихальних шляхів. У США ще у 1995 р. була розроблена Програма кислотних дощів, що передбачала систему торгівлі викидами діоксиду сірки та оксидів азоту. Ліміти на викиди ЗР (пилу, оксидів сірки та азоту) встановлено у країнах Євросоюзу, тому міжнародні угоди у цій царині ухвалюються на рівні Європи. На національному рівні в Україні наразі з 1992 року діє Закон України «Про охорону атмосферного повітря» [1] зі змінами, чинними з 01.10.2023 р. Наша країна є підписантом низки міжнародних документів, що обмежують обсяги викидів ЗР в атмосферу,

зокрема Директиви Європейського парламенту і ради 2010/75/ЄС «Про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання забрудненню та його контролю)» [2], Угоди про асоціацію між Україною та ЄС, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами у 2014 р. [3], Договору про заснування Енергетичного Співтовариства [4], Конвенції про транскордонне забруднення повітря на великі відстані [5]. Для реалізації Директиви 2010/75/ЄС був розроблений «Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок» у 2017 р. [6], який обмежить граничні обсяги викидів SO_2 , NO_x і пилу після 31.12.2033 р. Для обмеження викидів ЗР в атмосферу в Україні згідно з «Податковим кодексом України» [7] введено ставки податку за викиди в атмосферне повітря окремих ЗР стаціонарними джерелами забруднення. Зокрема, за викиди 1 тонни оксиду азоту (NO_x) та сірчистого ангідриду (SO_2) сплачується податок за кожну речовину в розмірі 2574,43 грн, за викиди 1 тонни твердих речовин ставка податку складає 96,99 грн. Для порівняння у США існує система торгівлі викидами SO_2 і NO_x в рамках Програм кислотних дощів з 1995 р. У 2022 р. ціна на дозвіл викидів SO_2 складала близько 35 дол. США/т, NO_x – 8,5 дол. США/т [8]. В ЄС встановлюються ліміти на викиди ЗР, за їх перевищення встановлюються штрафи [9].

У КПІ ім. Ігоря Сікорського вже десятиліттями активно розвивається науковий напрям, спрямований на підвищення енергоефективності та екологічної безпеки при спалюванні газу. В цьому напрямку активно працює проф. Г.Б. Варламов та його учні і послідовники [10–12]. Зокрема, у роботі [12] запропоновано методологічний підхід до комплексного енерго-екологічного аналізу із визначенням реального стану експлуатації теплоенергетичних об'єктів та обладнання енерговиробництва з використанням універсального коефіцієнта енерго-екологічної ефективності, який дозволяє у комплексі визначати одночасно рівень енергетичної ефективності й екологічної безпеки виробництва теплової та електричної енергії за показниками та характеристиками роботи устаткування.

Розробленням технологій та обладнання для зниження викидів ЗР в атмосферу багато років займався колектив науковців Інституту газу НАН України під керівництвом д-ра техн. наук, проф. І.Я. Сігала [13–14]. У колективній монографії, складеній провідними науковцями Інституту газу [14], наведено науковий та практичний внесок у розроблення технологій захисту атмосфери та обладнання, що забезпечує зниження викидів ЗР в атмосферу: пальники, котельні установки.

У публікації Кривди О.В. і Шахбазова І.О. [15] розглянуто методичний підхід до економічного обґрунтування впровадження комбінацій ланцюгів технологій щодо очищення димових газів від SO_2 , NO_x і пилу на енергоблоках чинних ТЕС України, що працюють на вугіллі, визначено інвестиційні витрати та вплив цих технологій на собівартість електричної енергії за життєвий цикл (LCOE). До традиційної формули розрахунку LCOE додано показник збільшення середньої зваженої собівартості електричної енергії за життєвий цикл на витрати по впровадженню заходів з очищення від викидів з димовими газами. Авторами публікації [15] обраховано та проаналізовано 14 варіантів заходів з очищення димових газів від пилових частинок, двооксиду сірки та оксидів азоту. З цих варіантів, що відповідають екологічним вимогам, вибрано найбільш економічний варіант – II (МСДГ – мокре сіркоочищення димових газів, ЕСФ – електростатичний фільтр, СКВ – селективне каталітичне відновлення) [15].

Досвід оцінки екологічного впливу також представлено у публікації Бахарева В.С., де проведено аналіз екологічної ситуації в районі Північного промислового вузла м. Кременчука [16]. На основі матеріалів оцінки впливу на навколишнє середовище, моніторингу рівнів забруднення та висновків громадської екологічної експертизи було розроблено рекомендації для мінімізації впливу підприємств-забруднювачів.

Врахування екологічного впливу у комплексній оцінці ефективності енергозберігальних заходів, що включає показники енергетичної (енергоємність та повна енергоємність продукції із визначенням показника енергоємності природоохоронних заходів), екологічної (питомі викиди ЗР) та економічної ефективності (включно із екологічним податком) запропоновано в Інституті загальної енергетики НАН України [17–26].

Мета роботи. Метою дослідження є розроблення методики комплексної оцінки заходів зі зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу внаслідок впровадження енергозберігальних (економія органічного палива) або природоохоронних заходів (очищення відхідних газів від викидів забруднюючих речовин).

2. Методи та матеріали

Аналіз динаміки викидів ЗР в Україні, за даними Державної служби статистики у 2013–2021 рр. [27], показує, що лідерами зі споживання палива та, відповідно, за обсягами викидів ЗР за викидами NO_x є такі секції економіки за КВЕД [28]: D «Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря», C «Переробна промисловість», B «Добувна промисловість і розроблення кар'єрів» та H «Транспорт, складське господарство, поштова та кур'єрська діяльність»; за викидами SO_2 – секції D, C і B; за викидами твердих частинок – секції D, C, A «Сільське господарство, лісове господарство та рибне господарство» та H «Транспорт та ін.». Поточні рівні викидів в енергоємних видах економічної діяльності (ВЕД) сприяють погіршенню навколишнього середовища, становлять значний ризик для здоров'я населення, яке проживає поблизу промислових зон [29–30]. Моніторинг та оцінка цих рівнів викидів є важливими кроками на шляху впровадження ефективних стратегій зменшення викидів ЗР [31–32]. За даними [6], Україна зобов'язалася поступово зменшувати викиди шкідливих речовин в атмосферу. У 2022 році оператори ТЕС, ТЕЦ та великих котелень здійснили емісію 40,1 тис. тонн пилю, 203,7 тис. тонн діоксиду сірки та 34,5 тис. тонн оксидів азоту, що відповідно на 47,1 %, 43,3 % та 56,1 % менше дозволених граничних обсягів [33].

«Національним планом скорочення викидів» передбачена низка технічних заходів, що сприятиме зниженню викидів SO_2 , NO_x та пилю для всіх великих спалювальних установок України [6].

Розгляд напрямів зменшення викидів ЗР в атмосферу дозволив сформулювати три основні групи заходів, що сприяють зниженню викидів ЗР. До першої групи відносяться заходи, які безпосередньо призводять до зниження таких викидів – впровадження заходів із підвищення енергоефективності та енергозбереження. Такі заходи зазвичай мають економічний ефект. До другої групи віднесено заходи із заміщення викопних органічних видів палива зі значними викидами ЗР на інші види палива з меншими обсягами викидів ЗР (вугілля (високі викиди оксидів сірки, оксидів азоту, пилю)) чи важкі нафтопродукти (менш високі викиди діоксидів сірки, оксидів азоту та твердих частинок) заміщуються природним газом (нульові викиди оксидів сірки та пилю і нижчі викиди оксидів азоту), біопаливом або відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ). Такі заходи можуть мати економічний ефект за умови значного подорожчання певних видів органічного палива, зниження собівартості виробництва енергії з ВДЕ або при державному стимулюванні такого виробництва. До третьої групи включено заходи, які безпосередньо спрямовані на зниження викидів, при цьому споживання енергоресурсів у технологічному процесі може зрости внаслідок врахування енерговитрат на функціонування очисного обладнання. В цій групі можна виділити дві підгрупи. Перша – зниження технологічних викидів (наприклад, використання некарбонатної сировини при виробництві вапна, цементу тощо). Заходи з цієї підгрупи можуть мати економічний ефект, якщо вартість некарбонатної сировини і відповідна модернізація обладнання буде дешевша за вартість вапняку чи доломіту. До другої підгрупи віднесено заходи з очищення димових газів. Впровадження таких заходів може мати економічний ефект лише при вкрай високих цінах (податках) на ЗР.

3. Результати та аналіз

В результаті аналізу існуючих підходів до оцінки ефективності природоохоронних заходів пропонується наступна комплексна оцінка заходів, що сприяють зниженню викидів ЗР:

1. Екологічні показники: обсяги викидів твердих частинок, SO_2 , NO_x мають відповідати нормативам ЄС згідно з Директивою 2010/75/EU (аналіз варіантів технологій та обладнання для зниження викидів). Послідовність оцінки екологічних показників наступна:

1.1 Вибір технологій для зниження викидів;

1.2 Порівняння із необхідним рівнем зниження викидів (складання ланцюга технологій);

1.3 Визначення зменшення викидів до та після впровадження заходів.

2. Енергетичні показники: визначення економії спожитого палива у разі впровадження заходів з підвищення енергетичної ефективності (заміна обладнання на більш ефективне – підвищення ККД технологічного процесу, заміна технології, що потребує менших енергоресурсів – зниження показників енергоємності та повної енергоємності продукції) й енергозбереження (зниження витрати палива при транспортуванні, зберіганні та використанні, приведення технологічного обладнання у відповідність до фактичних обсягів переробки чи виробництва – підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності, що впливає на наближення показників питомих витрат енергоресурсів до нормативних). Визначення потреби у паливі, що заміщує існуюче – для другої групи заходів. Оцінка додаткових енерговитрат на функціонування очисного обладнання чи реалізацію заходу (у випадку розгляду третьої групи заходів, що спрямовані виключно на зниження викидів).

3. Економічні показники: економічна оцінка варіантів зниження викидів ЗР за показниками економічної ефективності, які наведено нижче (використовується для усіх трьох груп заходів):

3.1 Чиста теперішня вартість проєкту з підвищення енергоефективності й енергозбереження, заміщення «брудного» палива менш «брудним», впровадження природоохоронних технологій (ЧТВ > 0);

3.2 Індекс рентабельності проєкту ($IP > 1,2$);

3.3 Відносне зменшення викидів ($> 80 \%$);

3.4 Розрахунок зниження операційних витрат на одиницю потужності ($> 20 \%$);

3.5 Розрахунок економії на дозволах на викиди;

3.6 Загальна річна економія (сума за п. 3.4 та 3.5).

Критерієм вибору технології є відповідність екологічним вимогам та показникам економічної ефективності з мінімізацією сумарних витрат на очисне обладнання (капітальних витрат) та додаткових енерговитрат на його функціонування (операційних витрат) при виборі різних варіантів проєкту.

Виходячи з вищезазначених екологічних, економічних та енергетичних показників, в Інституті загальної енергетики НАН України було проведено відповідні розрахунки. Нижче наведено приклад розрахунку для заходів третьої групи, за даними Центренерго [34], (табл. 1) з основними природоохоронними технологіями, їх ефективністю та орієнтовними витратами на їх впровадження.

Для прикладу взято усереднені дані по ТЕЦ м. Києва та ТЕС Київської обл. з [6]. Для цих електростанцій вибрано такі технології очищення від викидів ЗР: **Оксид сірки (SO_2)**: *Напівсуха десульфуризація димових газів*: Ця технологія передбачає обробку димових газів суспензією сорбенту, що дозволяє знизити викиди SO_2 до 90 %; перевагами є відсутність стічних вод та компактність установки [14]; **Оксиди азоту (NO_x)**: *Селективне некаталітичне відновлення (SNCR)*: Введення реагентів у зону високих температур котла призводить до зниження NO_x на 30–50 %; ця технологія є економічно вигідною для модернізації існуючих установок [14]; **Тверді частинки (пил)**: *Електрофільтри*: Високоєфективні установки, що забезпечують видалення до 99 % твердих частинок з димових газів. Вони широко використовуються на ТЕЦ для контролю пилових викидів [14].

Відповідно до європейських екологічних стандартів, встановлених Директивою 2010/75/ЄС, для великих спалювальних установок необхідно досягти таких рівнів викидів: SO_2 – не більше 200 мг/м³; NO_x – не більше 200 мг/м³; **Пил** – не більше 20 мг/м³ [2].

Розрахунок складається з кількох ключових критеріїв для оцінки економічної та екологічної ефективності проєкту (табл. 2).

Таблиця 1. Техніко-економічні показники природоохоронних технологій зі зниження викидів SO₂, NO_x та пилу

Забруднювач	Технологія	Ефективність зниження викидів (%)	Орієнтовні капітальні витрати (дол./кВт)	Орієнтовні експлуатаційні витрати (цент/кВт·год)
Пил	Електростатичні фільтри (ЕСФ)	99	25,6–46,4	0,028–0,037
	Тканинні (рукавні) фільтри (ТФ)	98	36	0,186
NO _x	Селективне некаталітичне відновлення (СНКВ)	30–50	9,3–13,96	—
	Селективне каталітичне відновлення (СКВ)	80	65,13–83,74	—
SO ₂	Напіvsуха десульфуризація (НСД)	50–60	1,67–5,3	0,216
	Мокре сіркоочищення димових газів (МСДГ)	95	83,74–120,9	0,261
	Новітня інтегрована десульфуризація (НІД)	95	46,52–65,13	1,67–2,23

Таблиця 2. Розрахунок екологічних та економічних показників природоохоронних технологій зі зниження викидів SO₂, NO_x та пилу

Критерій	Формула	Показник ефективності	Пояснення
Чиста теперішня вартість (ЧТВ)	$ЧТВ = \sum((Економія_t - Операційні\ витрати_t) / (1 + r)^t) - Капітальні\ витрати$	ЧТВ > 0	Позитивне ЧТВ свідчить про економічну вигідність проекту.
Термін окупності (ТО)	$ТО = Капітальні\ витрати / Загальна\ річна\ економія$	ТО < 3 років	Короткий термін окупності забезпечує швидку віддачу на інвестиції.
Індекс рентабельності (ІР)	$ІР = (ЧТВ + Капітальні\ витрати) / Капітальні\ витрати$	ІР > 1,2	Індекс > 1 вказує на рентабельність проекту.
Відносне зменшення викидів	Зменшення викидів (%) = $((E_2 - E_1) / E_0 * 100 \%$, де E ₂ , E ₁ , E ₀ – викиди після та до впровадження заходів; E ₀ – початкове значення, від якого оцінюється відсоток зменшення для аналізу ефективності заходів зі зменшення викидів.	Зменшення викидів > 80 %	Високий відсоток зменшення підтверджує відповідність екологічним стандартам.
Зниження операційних витрат на одиницю потужності	Зниження витрат на одиницю потужності = $((C_2 - C_1) / C_0) * 100 \%$, де C ₂ , C ₁ – операційні витрати після та до впровадження заходів; C ₀ – це базові або початкові витрати, які використовуються як вихідна точка для оцінки зниження витрат.	Зниження витрат > 20 %	Показує економічну ефективність нових заходів у довгостроковій перспективі.

Основні показники викидів по об'єктах теплоенергетики м. Києва та Київської обл. представлені у табл. 3.

Таблиця 3. Викиди ЗР на ТЕЦ м. Києва і ТЕС Київської обл. (сумарні)

Забруднювач	Викиди до впровадження заходів (E ₁), тис. т	Викиди після впровадження заходів (E ₂), тис. т
SO ₂	13,0	1,3
NO _x	3,0	1,5 - 2,1
Пил	4,0	0,04

Основні економічні параметри витрат на технології надано у табл. 4.

Таблиця 4. Економічні витрати на впровадження природоохоронних технологій

Забруднювач	Технологія	Ефективність зниження	Капітальні витрати (грн/кВт)	Експлуатаційні витрати (грн/кВт·год)
SO ₂	Напівсуха десульфуризація	До 90 %	7,2 млн – 12 млн	10
NO _x	Селективне некаталітичне відновлення	30–50 %	2 млн – 4 млн	4–8
Пил	Електрофільтри	До 99 %	6 млн – 10 млн	2–4

Розрахунок зниження операційних витрат, що обумовлене використанням нових технологій з нижчими експлуатаційними витратами, надано у табл. 5.

Таблиця 5. Операційні витрати на впровадження природоохоронних технологій

Забруднювач	Операційні витрати до впровадження заходів (C ₁), грн/кВт·год	Операційні витрати після впровадження заходів (C ₂), грн/кВт·год	Річна економія, тис. грн
SO ₂	15	10	1000
NO _x	15	6	1800
Пил	15	3	2400

Загальна річна економія від впровадження обраного ланцюга природоохоронних заходів представлена у табл. 6.

Таблиця 6. Загальна річна економія від впровадження природоохоронних технологій

Показник	Сума, тис. грн
Економія на дозволах	8580
Економія на операційних витратах	5200
Загальна річна економія	13780

Розрахунок **чистої теперішньої вартості** (ЧТВ) екологічного проекту при ставці дисконту 10 % і горизонті розрахунку на 10 років та загальних капітальних витратах 20 600 тис. грн складе:

$$\text{ЧТВ} = (13780 \times 6,1446) - 20\,600 = 64072,588 \text{ тис. грн.}$$

Згідно з розрахунками, сумарна річна економія становить 13780 тис. грн, а чиста теперішня вартість проекту за 10 років із 10 % дисконту дорівнює 64072,588 тис. грн. Це свідчить про високу економічну доцільність впровадження екологічних заходів на ТЕЦ Києва та ТЕС Київської області.

Відповідно до заходів зі зменшення викидів ЗР від великих спалювальних установок, включених до «Національного плану скорочення викидів» [6], використання наведених технологій дозволить зменшити викиди ЗР, зокрема на Дарницькій ТЕЦ (наведено як приклад) до таких рівнів:

- Оксиди сірки SO_2 – зменшення на 9 265,35 т/рік до рівня 487,65 т/рік, при цьому капітальні витрати складатимуть \$84,159 тис., а вартість уловлювання оксидів сірки становитиме приблизно \$681 929,8 на рік (або \$73,6/тонну);

- Оксиди азоту NO_x – зменшення на 2 370,104 т/рік до рівня 323,196 т/рік, із капітальними витратами \$74,802 тис;

- Тверді частинки – зменшення на 4 158 т/рік до рівня 42 т/рік пилу, капітальні витрати будуть \$25,728 тис., а експлуатаційні – в межах 0,028-0,037 цент/кВт.

Підсумовуючи всі капітальні витрати для реалізації розглянутих технологій на приведеній електростанції, доходимо висновку, що необхідні капіталовкладення в розмірі \$184,689 тис. Експлуатаційні питомі витрати збільшаться на 0,289 цент/кВт, або \$681 929,8 на рік.

4. Висновки

У статті розглянуті міжнародні екологічні зобов'язання, які взяла на себе Україна щодо викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Розглянуті існуючі методичні підходи до оцінки впливу викидів забруднюючих речовин та врахування їх при виборі ефективних технологій. Найбільш застосованими є показники зниження питомих викидів на одиницю продукції, зниження екологічного податку, середньозважена собівартість енергії на природоохоронні заходи за життєвий цикл. Проаналізовано секції економіки за обсягами споживання органічного палива та викидами забруднюючих речовин, зокрема пилу, оксидів сірки та азоту. Виявлено, що найбільшим забруднювачем є секція «Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря». Для визначення напрямів зменшення викидів забруднюючих речовин в атмосферу запропоновано три основні групи заходів, що сприяють зниженню викидів ЗР: внаслідок досягнутої економії палива при впровадженні заходів з підвищення енергетичної ефективності та енергозбереження, внаслідок заміщення органічного палива з високим вмістом забруднюючих речовин іншим видом палива з меншим вмістом забруднюючих речовин або відновлюваними джерелами енергії, внаслідок впровадження технологій зі знешкодження забруднюючих речовин. Авторами статті запропоновано комплексну оцінку заходів зі зниження викидів в атмосферу, що послідовно і комплексно оцінює відповідність викидів після впровадження заходів граничним нормам, економічні витрати на встановлення очисного обладнання та додаткові енергетичні витрати на його функціонування. Наведено розрахунковий приклад оцінки ефективності заходів зі зниження викидів забруднюючих речовин внаслідок їх знешкодження шляхом реалізації очисного обладнання для кожного виду забруднюючих речовин. Представлений методологічний підхід комплексної оцінки характеризується універсальністю застосування на різних ієрархічних рівнях економіки: країна, вид економічної діяльності, установка.

Внесок авторів. Ідея комплексної оцінки природоохоронних заходів, вибір показників ефективності та їх пріоритетність, частина літературного огляду – Маляренко О.Є.; аналіз динаміки викидів забруднюючих речовин, пошук вихідних даних для розрахунку прикладу – Горський В.В.; огляд нормативних актів, ратифікованих Україною щодо зменшення викидів забруднюючих речовин, підготовка анотації – Іваненко Н.П.; розширений перелік економічних показників, що є складовою комплексної оцінки природоохоронних заходів, розрахунок прикладу – Євтухова Т.О.; частина літературного огляду, літературний переклад анотації на англійську мову, підготовка списку посилань – Матушкін Д.С.

Фінансування роботи. Наукове дослідження виконано в рамках фундаментальної наукової роботи «Розвиток системи математичних моделей довгострокового прогнозування споживання основних видів паливно-енергетичних ресурсів в економіці країни з урахуванням діючих екологічних обмежень» (2022–2026 рр.) № держреєстрації РК0122U000178.

Посилання

1. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 16.10.1992 № 2707-XII. Відомості Верховної Ради України. 1992. № 50. Ст. 678. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text> (дата звернення: 28.10.2024).
2. Директива 2010/75/ЄС «Про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання забрудненню та його контролю)». URL: https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/%202010_75_%D0%95%D0%A1.pdf (дата звернення: 28.10.2024).
3. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої сторони: Угода Україна від 27.06.2014. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text (дата звернення: 28.10.2024).
4. Договір про заснування Енергетичного Співтовариства. Договір Європ. співтовариства від 25.10.2005. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_926#Text (дата звернення: 28.10.2024).
5. Конвенція про транскордонне забруднення повітря на великі відстані. Конвенція Орг. Об'єдн. Націй від 13.11.1979. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_223#Text (дата звернення: 28.10.2024).
6. Національний план скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1704-IX> (дата звернення: 28.10.2024).
7. Податковий кодекс України: Кодекс України від 02.12.2010 № 2755-VI: станом на 1 жовт. 2024 р. Відомості Верховної Ради України. 2011. № 13-14, № 15-16, № 17. Ст. 112. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text> (дата звернення: 28.10.2024).
8. EPA Progress Report – Program Compliance and Market Activity. URL: <https://www.epa.gov/power-sector/progress-report-program-compliance-and-market-activity> (Last accessed: 28.10.2024).
9. Level of ambition with respect to SO₂, Dust and NO_x emission levels in the LCPD, the IPPCD and the IED. European Environment Agency. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/level-of-ambition-with-respect> (Last accessed: 28.10.2024).
10. Varlamov G., Romanova K., Nazarova I., Dashchenko O., Kapustiansky A. Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes. *Archives of Thermodynamics*. 2017. Vol. 38. No. 4. P. 127–137. <https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0028>
11. Варламов Г.Б., Романова К.О., Цзян Цзянгуо, Чжан Вейце. Економічні важелі як основа підвищення енерго-екологічної ефективності енерговиробництва. *Сталий розвиток — XXI століття. Дискусії 2020*: колективна монографія. Національний університет «Києво-Могилянська академія»; за ред. проф. Хлобистова С.В. Київ, 2020. С. 264–272. ISBN: 978-617-7668-22-9. URL: https://9922dac3-967f-46d7-a171-70a3fd248a04.filesusr.com/ugd/b93fb2_957a0f54aad147918141fadac941e1da.pdf.
12. Varlamov G., Romanova K., Zhang Weijie, Jiang Jianguo, Wu Zongyan. Methodological basis for a comprehensive assessment of the efficiency of energy production by energy-environmental indicators. *Power Engineering: economics, technique, ecology*. 2022. No. 1. P. 18–26. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259141>
13. Sigal I.Ya., Smikhula A.V., Duboshiy O.M., Horbunov O.V., Horbunov A.O. Reducing the formation of nitrogen oxides during the combustion of natural gas. *Energy Technologies & Resource Saving*. 2016. No. 4. P. 44–51.
14. Сміхула А.В., Сігал І.Я., Бондаренко Б.І., Семенюк Н.І. Технології зниження шкідливих викидів до атмосфери тепловими електростанціями та котельними великої і середньої потужності України: монографія. Київ: ФОП Маслаков, 2019. 108 с.
15. Кривда О.В., Шахбазов І.О. Оцінка економічності впровадження заходів зменшення викидів з димовими газами на ТЕС України. *Збірник тез доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції «Бізнес, інновації, менеджмент: проблеми та перспективи»* (Київ, 22 квітня 2021 р.). Київ: КІП ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2021. 288 с. ISBN 978-966-990-024-1. С. 172-173.
16. Бахарев В.С., Корцова О.Л., Харламова О.В., Волошина В.Г. Наукова еколого-експертна оцінка екологічної ситуації, що склалась у районі Північного промвузла м. Кременчук. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2017. Вип. 5(106). С. 101–108.
17. Кулик М.М., Маляренко О.Є., Майстренко Н.Ю., Станиціна В.В., Куц Г.О. Енергоефективність та прогнозування енергоспоживання на різних ієрархічних рівнях економіки: методологія, прогнозні оцінки до 2040 року. Київ: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2021. 234 с.
18. Lenchevsky E. Prospective directions for the modernization of the load control system of the central energy system of Ukraine. *System Research in Energy*. 2023. No. 1. P. 46–54. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.046>
19. Горський В.В. Забруднення повітря промисловими блок-станціями та можливі шляхи вирішення проблеми. *Вісник Херсонського національного технічного університету*. 2023. № 3(86). С. 9–15. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.3.1>
20. Куц Г.О., Тесленко О.І. Прогнозна оцінка повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії України за виробничими схемами до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. Вип. 2(65). С. 44–52. <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.044>
21. Дерій В.О. Оцінка економічної ефективності теплогенеруючих технологій для систем централізованого теплопостачання. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. Вип. 2(65). С. 21–27. <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.021>

22. Жуков Л., Петренко Д. Ресурсозберігаючий безперервний оптичний контроль температури рідкого металу в металургії енергетичного машинобудування. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 3(74). С. 64–77. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.064>
23. Русанов А., Костіков А., Федорейко В., Кардаш Д., Тарасова В., Ганжа М., Кузнецов М. Підвищення енергоефективності та економічності когенераційної енергоустановки з повітряною турбіною. *Системні дослідження в енергетиці*. 2023. № 4(75). С. 4–16. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.004>
24. Майстренко Н., Клімук І. Заходи з енергозбереження в метрополітені (на прикладі біметалевих контактних рейок). *Системні дослідження в енергетиці*. 2024. № 3(79). С. 80–88. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.080>
25. Шорхт Ф., Коурті І., Скалет Б. М., Рудьє С., Дельгадо Санчо Л. Довідковий документ з найкращих доступних технологій та методів управління (НДТМ) для виробництва цементу, вапна та оксиду магнію. Люксембург, 2013. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/07/v5NDTM-TSement-vapno-ta-oksyt-magniyu-Final.pdf>.
26. Майстренко Н.Ю. Прогнозування енергоспоживання для сектору загального державного управління в економіці України до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2022. Вип. 1-2(68-69). С. 82–89. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.082>
27. Державна служба статистики України. URL: <https://stat.gov.ua/uk/datasets/vykydy-zabrudnyuyuchykh-rechovyn-i-parnykovykh-haziv-v-atmosferne-povityra> (дата звернення: 28.10.2024).
28. Класифікація видів економічної діяльності (КВЕД-2010). URL: https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html (дата звернення: 28.10.2024).
29. Бурячок Т.О., Буцьо З.Ю., Варламов Г.Б. та ін. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Енциклопедія. Книга 5. *Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі* [Електронний ресурс]. 2013. 390 с. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-3/section-2/2-3> (дата звернення: 28.10.2024).
30. Негода Н., Жукова О., Кордуба І. Екологічні аспекти оцінки стану урбоекосистем та здоров'я населення. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2024. Вип. 3(146). С. 66–72. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.3.9>
31. Коберник В.С. Економічні аспекти впровадження заходів зменшення викидів з димовими газами на ТЕС України. *Проблеми загальної енергетики*. 2020. Вип. 1(60). С. 47–54. <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.047>
32. Zaporozhets A., Babak V., Sverdlova A., Scherbak L., Kuts Yu. Reystem Research in Energview of the state of air pollution by energy objects in Ukraine. *System Research in Energy*. 2022. No. 2(71). P. 42–52. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.042>
33. Україна дотримується взятих зобов'язань щодо скорочення загального обсягу викидів [Електронний ресурс]. ДП «Держзовнішінформ». URL: <https://dzi.gov.ua/press-centre/news/ukrayina-dotrymuyetsya-vzyatyh-zobov-yazan-shhodo-skorochennya-zagalnogo-obsyagu-vykydiv/> (дата звернення: 31.03.2024).
34. Дані Центренерго. URL: <https://www.centrenergо.com> (дата звернення: 20.11.2024).

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. (1992). On Air Protection: Law of Ukraine dated October 16, 1992, No. 2707-XII (as of October 1, 2023). *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR)*, 50, Art. 678. Retrieved October 28, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text> [in Ukrainian].
2. European Parliament and Council. (2010). Directive 2010/75/EU on industrial emissions (integrated pollution prevention and control). Retrieved October 28, 2024, from https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/55-GOEEI/%202010_75_%D0%84%D0%A1.pdf [in Ukrainian].
3. Association Agreement between the European Union and the European Atomic Energy Community and their Member States, of the one part, and Ukraine, of the other part. (2014). Agreement dated June 27, 2014 (as of November 30, 2023). Retrieved October 28, 2024, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text [in Ukrainian].
4. Treaty establishing Energy Community. (2005). Treaty of the European Community dated October 25, 2005. Retrieved October 28, 2024, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_926#Text [in Ukrainian].
5. United Nations. (1979). Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution: United Nations Convention dated November 13, 1979 (as of November 30, 1999). Retrieved October 28, 2024, from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/995_223#Text [in Ukrainian].
6. Verkhovna Rada of Ukraine. (2021). On the Implementation of the National Emission Reduction Plan from Large Combustion Plants: Resolution of the Verkhovna Rada of Ukraine on July 16, 2021 No. 1704-IX. Retrieved October 28, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/go/1704-IX> [in Ukrainian].
7. Verkhovna Rada of Ukraine. (2010). Tax Code of Ukraine: Code of Ukraine dated December 2, 2010, No. 2755-VI (as of October 1, 2024). *Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR)*, 2011, No. 13-14, 15-16, 17, Art. 112. Retrieved October 28, 2024, from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#Text> [in Ukrainian].

8. U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). EPA Progress Report – Program Compliance and Market Activity. Retrieved October 28, 2024, from <https://www.epa.gov/power-sector/progress-report-program-compliance-and-market-activity>
9. European Environment Agency. (n.d.). Level of ambition with respect to SO₂, Dust and NO_x emission levels in the LCPD, the IPPCD and the IED. Retrieved October 28, 2024, from <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/level-of-ambition-with-respect>
10. Varlamov, G., Romanova, K., Nazarova, I., Dashchenko, O., & Kapustiansky, A. (2017). Improvement of energy efficiency and environmental safety of thermal energy through the implementation of contact energy exchange processes. *Archives of Thermodynamics*, 38(4), 127–137. <https://doi.org/10.1515/aoter-2017-0028>
11. Varlamov, G.B., Romanova, K.O., Jiang, J., & Zhang, W. (2020). Economic instruments as a basis for improving the energy-ecological efficiency of energy production. In Y. Khlobystov (Ed.), *Sustainable Development – XXI Century. Discussions 2020* [Collective Monograph] (pp. 264–272). National University “Kyiv-Mohyla Academy.” https://9922dac3-967f-46d7-a171-70a3fd248a04.filesusr.com/ugd/b93fb2_957a0f54aad147918141fadac941e1da.pdf [in Ukrainian].
12. Varlamov, G., Romanova, K., Zhang, W., Jiang, J., & Wu, Z. (2022). Methodological basis for a comprehensive assessment of the efficiency of energy production by energy-environmental indicators. *Power Engineering: Economics, Technique, Ecology*, 1, 18–26. <https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2022.259141>
13. Sigal, I.Y., Smikhula, A.V., Duboshyi, O.M., Horbunov, O.V., & Horbunov, A.O. (2016). Reducing the formation of nitrogen oxides during the combustion of natural gas. *Energy Technologies & Resource Saving*, 4, 44–51.
14. Smikhula, A., Sigal, I., Bondarenko, B., & Semeniuk, N. (2019). Technologies for reducing harmful emissions to the atmosphere from thermal power plants and large and medium-capacity boilers in Ukraine [Monograph]. FOP Maslakov, 108 p. [in Ukrainian].
15. Kryvda, O., & Shakhbazov, I. (2021). Assessment of the economic efficiency of implementing measures to reduce emissions from flue gases at thermal power plants in Ukraine. *Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference "Business, Innovation, Management: Problems and Perspectives"* (pp. 172–173). Kyiv: Igor Sikorsky KPI, Politekhnik Publishing House. ISBN 978-966-990-024-1 [in Ukrainian].
16. Baharyev, V., Korzova, O., Kharlamova, O., & Voloshyna, V. (2017). Scientific environmental and expert assessment of the environmental situation in parts of northern industrial junction of Kremenchuk. *Bulletin of Mykhailo Ostrohradskyi National University of Kremenchuk*, 5(106), 101–108 [in Ukrainian].
17. Kulyk, M., Maliarenko, O., Maistrenko, N., Stanytsyna, V., & Kuts, H. (2021). *Energy efficiency and forecasting energy consumption at different hierarchical levels of the economy: Methodology, forecast estimates until 2040*. NVP "Publishing House "Scientific Thought" of the NAS of Ukraine [in Ukrainian].
18. Lenchevsky, E. (2023). Prospective directions for the modernization of the load control system of the central energy system of Ukraine. *System Research in Energy*, 1(72), 46–54. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.046>
19. Horskyj, V. (2023). Air pollution by industrial units and possible ways to solve the problem. *Bulletin of Kherson National Technical University*, 3(86), 9–15 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2023.3.1>
20. Kuts, H.O., & Teslenko, O.I. (2021). The forecast of total technological energy intensity of ferrous metallurgy products of Ukraine according to the production schemes till 2040. *The Problems of General Energy*, 2(65), 44–52 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.044>
21. Derii, V.O. (2021). Economic efficiency of district heating systems' heat generation technologies. *The Problems of General Energy*, 2(65), 21–27 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2021.02.021>
22. Zhukov, L., & Petrenko, D. (2023). Resource-Saving Continuous Optical Control of Liquid Metal Temperature in Metallurgy of Energy Machine Building. *System Research in Energy*, 3(74), 64–77 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.064>
23. Rusanov, A., Kostikov, A., Fedoreiko, V., Kardas, D., Tarasova, V., Ganzha, M., & Kuznetsov, M. (2023). Increasing the efficiency and economy of a cogeneration power plant with an air turbine. *System Research in Energy*, 4(75), 4–16 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.004>
24. Maistrenko, N., & Klimuk, I. (2024). Energy saving measures in the metro (on the example of bimetallic contact rails). *System Research in Energy*, 3(79), 80–88 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.080>
25. Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B.M., Roudier, S., & Delgado Sancho, L. (2013). *Reference document on the best available techniques (BAT) and management methods for cement, lime, and magnesia production*. Luxembourg. Retrieved from <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/07/v5NDTM-TSement-vapno-ta-oksyt-magniyu-Final.pdf> [in Ukrainian].
26. Maistrenko, N. (2022). The prediction of energy consumption for the sector of general government in the Ukrainian economy until 2040. *The Problems of General Energy*, 1-2(68-69), 82–89 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.082>
27. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). State Statistics Service of Ukraine. Retrieved October 28, 2024, from <https://www.ukrstat.gov.ua> [in Ukrainian].
28. State Statistics Service of Ukraine. (n.d.). Classification of types of economic activity (KVED-2010). Retrieved October 28, 2024, from https://kved.ukrstat.gov.ua/KVED2010/kv10_i.html [in Ukrainian].
29. Buryachok, T., Butsyo, Z., Varlamov, H., & others. (2013). Energy: History, Modernity, and Future. Encyclopedia [Electronic resource]. Book 5. Electric Power Engineering and Environmental Protection. Functioning of Energy in

- the Modern World. Retrieved October 28, 2024, from <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-3/section-2/2-3> [in Ukrainian].
30. Nehoda, N., Zhukova, O., & Korduba, I. (2024). Environmental aspects of assessing the state of urban ecosystems and public health. *Bulletin of Mykhailo Ostrogradsky National University of Kremenchug*, 3(146), 66–72 [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.3.9>
 31. Kobernik, V.S. (2020). Economic aspects of the implementation of measures to reduce emissions from flue gases at thermal power plants of Ukraine. *The Problems of General Energy*, 1(60), 47–54. [in Ukrainian]. <https://doi.org/10.15407/pge2020.01.047>
 32. Zaporozhets, A., Babak, V., Sverdlova, A., Scherbak, L., & Kuts, Yu. (2022). Review of the state of air pollution by energy objects in Ukraine. *System Research in Energy*, 2(71), 42–52. <https://doi.org/10.15407/srenergy2022.02.042>
 33. State Enterprise "Derzhzovnishinform". (2023, March 31). Ukraine complies with its commitments to reduce total emissions. Retrieved October 28, 2024, from <https://dzi.gov.ua/press-centre/news/ukrayina-dotrymuyetsya-vzvyatyh-zobov-yazan-shhodo-skorochnennya-zagalnogo-obsyagu-vykydiv> [in Ukrainian].
 34. Centrenergo. (n.d.). Data from Centrenergo. *Official website*. Retrieved from <https://www.centrenergo.com> [in Ukrainian].

COMPREHENSIVE ASSESSMENT OF MEASURES TO REDUCE ATMOSPHERIC POLLUTANT EMISSIONS

Olena Maliarenko^{1*}, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5882-916X>

Vitalii Horskyi¹, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0001-9128-9556>

Nataliya Ivanenko¹, PhD (Engin.), Senior Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5438-1556>

Tatiana Eutukhova^{1,2}, PhD (Engin.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0003-4778-2479>

Dmytro Matushkin¹, PhD (Engin.), <https://orcid.org/0000-0003-4431-7862>

¹General Energy Institute of NAS of Ukraine, 172, Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine;

²Interregional Academy of Personnel Management, 2, Frometivska St., Kyiv, 03039, Ukraine

*Corresponding author: malyarenlena@gmail.com

Abstract. *The article examines Ukraine's international environmental commitments to reduce atmospheric pollutant emissions, specifically dust, sulfur oxides, and nitrogen oxides. The energy consumption volumes and pollutant emissions across economic sectors were analyzed. It was determined that the industrial sector is the largest source of pollutant emissions, with Manufacturing and Electricity, Gas, Steam, and Air Conditioning Supply leading in both emissions and energy consumption. Three main groups of measures for reducing atmospheric emissions are identified: improving the energy efficiency and energy conservation to achieve fuel savings, substituting high-emission fuels with low-emission or renewable energy sources, and applying pollutant neutralization technologies to mitigate emissions. The proposed comprehensive assessment is intended for the selection of effective technologies for emission reduction. The methodology of the comprehensive assessment includes environmental indicators to ensure compliance with emission limits according to the accepted obligations, economic indicators to evaluate costs related to fuel savings, purification equipment, and emission reduction measures, and energy indicators to assess fuel consumption reductions and additional electricity consumption for purification systems. It is proposed to compare possible options for implementing environmental protection measures using the criterion of minimum costs. The originality of the methodological approach lies in its universality, the possibility of application for assessing measures at various hierarchical levels of the economy: country, type of economic activity, installation.*

Keywords: emissions of pollutants, types of economic activity, energy saving, assessment of environmental protection measures.

Надійшла до редколегії: 26.12.2024