

**Усов І.Л.**

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

**Шелешей Т.В.**

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

## ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ: АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ ОЧИЩЕННЯ ВИКИДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО МОДЕРНІЗАЦІЇ

*Зростаюча екологічна загроза, спричинена викидами від теплових електростанцій, зумовлює необхідність пошуку рішень для зниження негативного впливу на довкілля. Теплова енергетика досі залишається одним із основних джерел забруднення повітря та викидів парникових газів.*

*Метою цього дослідження стало систематичне узагальнення наукових і технічних підходів до підвищення екологічної ефективності теплових електростанцій (ТЕС) на основі огляду понад 35 наукових публікацій із баз Scopus, Web of Science та вітчизняних видань і комп'ютерного моделювання викидів для 500-МВт вугільних котлоагрегатів. Проаналізовано шість ключових технологічних рішень. Впровадження систем рекуперації тепла й контактних теплообмінників підвищує тепловий коефіцієнт корисної дії (ККД) котлоагрегатів на 10–15%, що забезпечує повторне використання вторинної енергії димових газів. Перехід на альтернативні види палива (біомасу, природний газ або їх комбінацію) дозволяє знизити викиди CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> і NO<sub>x</sub> у середньому на 20–30% порівняно з вугіллям. Очищення димових газів за допомогою SCR-систем, скрубєрів і електрофільтрів дає змогу зменшити концентрації NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> і твердих частинок у діапазоні 70–99% залежно від конфігурації обладнання. Використання когенераційних установок підвищує загальний ККД до 80% та скорочує викиди CO<sub>2</sub> на 20–30% у порівнянні зі стандартними технологіями, а автоматизація й цифрове керування процесами сприяють додатковому зниженню енергетичних витрат і забруднень до 30%. Комплексна інтеграція цих підходів дозволяє досягти одночасного екологічного та економічного ефекту за умови підтримки з боку держави та наявності нормативної бази. Практична цінність роботи полягає у формуванні кількісних показників ефективності кожного рішення й розробці дорожньої карти модернізації українських ТЕС з урахуванням стандартів сталого розвитку.*

**Ключові слова:** енергоефективність, димові гази, когенерація, технології спалювання палива, автоматизація процесів горіння, екологічні стандарти.

**Постановка проблеми.** Сучасна енергетика України перебуває на перехресті критичних змін, що зумовлено як внутрішніми економічними викликами, так і глобальними екологічними тенденціями. Зношеність енергетичної інфраструктури, залежність від викопних джерел енергії, а також зобов'язання щодо зниження викидів парникових газів формують необхідність трансформації технологій виробництва електроенергії. Особливої уваги потребують ТЕС, які залишаються основою енергетичного балансу України, але водночас є одними з найбільших джерел забруднення довкілля. Забезпечення екологічної безпеки та енергоефективності ТЕС є важливим

кроком у напрямку сталого розвитку, відповідності міжнародним зобов'язанням та досягнення енергетичної незалежності.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вчений Ч. Добре (С. Dobre 2024) зазначав, що модернізація ТЕС у країнах Центральної та Східної Європи шляхом впровадження когенераційних систем дозволила знизити викиди парникових газів до 25% у порівнянні з традиційними підходами до генерації енергії. У дослідженні Н. Фіалко, Р. Навродська (2021) обґрунтовано ефективність застосування технологій глибокої утилізації теплоти димових газів, що забезпечує підвищення (ККД) котлоагрегатів на 5–8% та одночасне зниження викидів СО

та  $\text{NO}_x$ . Такі підходи мають особливе значення для українських ТЕС, де рівень зношеності обладнання є критичним.

Х. Крістінссон та С. Ланг (H. Kristinsson та S. Lang 2021) у своєму дослідженні, довели, що впровадження цифрових систем керування процесами горіння підвищує стабільність та гнучкість роботи енергетичних установок. Додаткову увагу до цифровізації процесів також приділили вчені Г. Цоумаліс та З. Бампос (G. Tsoumalis та Z. Vampos 2022), які показали, що використання автоматизованих систем дозволяє зменшити викиди забруднювальних речовин на 20–30% навіть без капітальної реконструкції.

На думку Чжоу та Янг (Zhou та Zhang 2023), одним із ключових напрямків виконання забор'язань за Паризькою кліматичною угодою є впровадження когенераційних систем на основі біомаси та синтез-газу, що не лише зменшує викиди  $\text{CO}_2$ , а й сприяє диверсифікації паливного балансу. У свою чергу, В. Езе та співавтори (V. Eze et al. 2024) довели, що використання малих когенераційних установок із інтелектуальними системами керування забезпечує досягнення ККД до 88% і водночас знижує витрати палива. Це особливо актуально для децентралізованих систем енергозабезпечення в умовах сучасних викликів.

Крім того, дослідження А. Замулко і Довгаль (A. Zamulko та M. Dovhal 2023) акцентує увагу на тому, що розвиток українських ТЕС має бути тісно пов'язаний із процесами євроінтеграції, які передбачають відповідність екологічним нормам ЄС. Автори підкреслюють, що лише за умов адаптації сучасних технологічних рішень до локальних умов можна досягти екологічної стійкості й енергетичної ефективності.

Таким чином, питання екологізації та підвищення енергоефективності ТЕС є комплексним і вимагає міждисциплінарного підходу, що охоплює модернізацію топкових систем, впровадження чистих технологій, використання альтернативного палива та автоматизоване керування процесами горіння. Мета дослідження – провести огляд сучасних підходів до підвищення екологічної ефективності ТЕС шляхом удосконалення обладнання та зниження шкідливих викидів.

У даному дослідженні застосовано комплексний підхід, який поєднує теоретичні, аналітичні методи для вивчення шляхів підвищення екологічної ефективності ТЕС в умовах України. Такий підхід дозволив забезпечити цілісне бачення проблеми і сформував основу для практичної реалізації заходів з модернізації ТЕС.

Теоретичні методи включають системний аналіз наукових джерел і синтез існуючих підходів до зниження викидів

Аналітичний метод було використано для вивчення науково-технічної літератури, нормативно-правової бази та технічної документації, що стосується експлуатації котлоагрегатів. Також проведено аналіз наукових публікацій, зокрема Карпенко та ін. (2022), Саїдур та ін (2020), Чжоу та Янг (Zhou & Zhang 2023), які надали теоретичну основу для порівняння різних технологій підвищення енергоефективності.

Порівняльний метод було застосовано для аналізу ефективності технічних рішень у сфері рекуперації теплоти димових газів Фіалко та ін. (2021), когенераційних технологій Дрождж та ін. (Drożdż et al., 2024), систем очищення викидів Г. Цоумаліс (G. Tsoumalis et al., 2022) і заміщення традиційного палива біомасою Езе та ін. (Eze et al., 2024).

Фактичну базу дослідження склали технічні характеристики обладнання, зокрема котлоагрегатів Siemens, Viessmann та Bosch Industrial. Було проаналізовано інформацію, оприлюднену на офіційних сайтах компаній. Наприклад, детальні технічні рішення для промислових котлів були розглянуті на базі публікацій Siemens AG (n.d.).

Частину розрахункових підходів було адаптовано з міжнародних досліджень, щоб забезпечити відповідність результатів загальносвітовим стандартам. Застосовані методи також дозволяють здійснити повторюваність дослідження за умов наявності аналогічних початкових технічних даних. Таким чином, дослідження ґрунтується на поєднанні нормативної бази, наукових джерел, сучасних технологій, а також використанні офіційних статистичних та технічних ресурсів.

**Постановка завдання.** Метою статті є комплексний аналіз сучасних технологій очищення викидів теплових електростанцій та підходів до модернізації їх енергетичного обладнання з позицій підвищення екологічної ефективності й енергоефективності. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються такі основні завдання:

– проаналізувати сучасний стан викидів шкідливих речовин від енергоблоків ТЕС та чинні екологічні вимоги до їх обмеження;

– узагальнити та систематизувати наукові підходи й технології очищення димових газів від оксидів азоту, сірки, твердих частинок та вуглекислого газу;

– оцінити потенціал когенераційних технологій, схем рекуперації тепла та паливної диверси-

фікації щодо зменшення негативного впливу ТЕС на довкілля;

- проаналізувати роль цифровізації та автоматизованих систем керування топковими процесами у підвищенні екологічної ефективності роботи ТЕС;

- сформулювати узагальнені рекомендації щодо пріоритетних напрямів модернізації українських теплових електростанцій з урахуванням вимог сталого розвитку та міжнародних екологічних стандартів.

**Виклад основного матеріалу.** Енергетичний сектор України станом на 2024 рік перебуває у процесі глибокої трансформації під впливом геополітичних ризиків, економічних викликів та екологічних обмежень. Основними проблемами залишаються зношеність інфраструктури, залежність від викопного палива та імпортованого газу, а також низький рівень енергоефективності. Більшість українських ТЕС була побудована у 1960–1980-х роках, і нині працюють понад проектний термін експлуатації, що призводить до підвищених витрат палива, зростання викидів і зниження ефективності Карпенко та ін. (Karpenko et al.), 2022; Замулко та Довгань (Zamulko & Dovhal, 2023).

Водночас, Україна зобов'язалася виконувати міжнародні кліматичні цілі, зокрема скорочення викидів парникових газів відповідно до Паризької кліматичної угоди. Проте фактична реалізація цих зобов'язань ускладнена через технологічну відсталість багатьох ТЕС та низький рівень впровадження сучасних енергоощадних технологій Міністерство енергетики України, 2023; Кабей та Оланреважу (Kabeyi & Olanrewaju, 2022).

У відповідь на ці виклики в науковому середовищі розглядаються варіанти підвищення ефективності ТЕС за рахунок модернізації обладнання, переходу до комбінованого виробництва тепла та електроенергії, а також впровадження більш ефективних схем управління теплом Сосновський та Онацький (Sosnovskiy & Onatskiy, 2022).

Україна задекларувала зобов'язання в рамках Паризької кліматичної угоди щодо скорочення викидів CO<sub>2</sub> (UNFCCC, 2015). У 2021 році Україна подала оновлений Національно визначений внесок (NDC) до Секретаріату РКЗК ООН. У ньому Україна зобов'язується скоротити викиди парникових газів на 65% до 2030 року порівняно з рівнем 1990 року. Цей документ є офіційним підтвердженням зобов'язань України в рамках Міністерства захисту довкілля та природних ресурсів України 2021. Однак виконання цих зобов'язань ускладнене через технологічну відсталість ТЕС і недостатній

рівень впровадження відновлювальних джерел Кабей та Оланреважу (Kabeyi & Olanrewaju, 2022); Чжоу та Янг (Zhou & Zhang, 2023).

Згідно з дослідженням Фіалко та ін. (Fialko et al. 2021), понад 70% обладнання на об'єктах ТЕС перебуває у зношеному стані, що не відповідає сучасним критеріям ефективності та екологічної безпеки. У свою чергу, Фарагіл та ін. (Farghali et al. 2023) підкреслюють необхідність впровадження стратегій енергозбереження як ключового елементу подолання енергетичної кризи й підвищення стійкості систем. Як додають Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024), розбудова інноваційних когенераційних систем із низьким рівнем викидів є дієвим інструментом зменшення енергетичної залежності та екологічного навантаження.

Як зазначають Замулко і Довгань (Zamulko i Dovhal 2023), розвиток ТЕС в умовах європейської інтеграції потребує пріоритетної уваги до екологічної безпеки та відповідності нормам ЄС. Водночас, як наголошує Оланреважу (Olanrewaju 2022), енергетична реформа має враховувати й соціальні наслідки – від енергетичної бідності до потреби у перекваліфікації кадрів, особливо у вугільних регіонах. Таким чином, виклики теплоенергетики вимагають комплексного підходу до реформування: від оновлення інфраструктури й впровадження новітніх технологій до реалізації політики сталого розвитку, залучення інвестицій і забезпечення відповідності міжнародним зобов'язанням.

Поглиблюючи аналіз, варто детально розглянути екологічні наслідки функціонування ТЕС як одного з ключових джерел забруднення довкілля в Україні. Теплові електростанції залишаються одним з основних джерел шкідливих викидів в атмосферу, спричиняючи багатовекторний екологічний вплив – від локального забруднення повітря до глобальних кліматичних змін. Ці речовини є каталізаторами кислотних дощів, смогу, деградації ґрунтів, а також чинниками зростання онкологічних та респіраторних захворювань серед населення.

Як вказано в роботі Риндюк та ін (2020), використання мазуту з високим вмістом сірки призводить до суттєвого зростання викидів SO<sub>2</sub>, які не завжди повною мірою вилучаються фільтраційними системами, особливо на застарілих енергоблоках. Дослідження Лі та Лі (Lee & Lee 2021) також демонструє, що традиційні методи спалювання палива, характерні для більшості ТЕС у країнах Східної Європи, мають обмежені можливості щодо скоро-

чення емісій навіть за умови оптимізації процесів горіння. У роботі Кабейї та Оланреваю (Kabeyi & Olanrewaju 2022) наголошується, що вплив ТЕС на навколишнє середовище не обмежується атмосферними викидами, а охоплює також теплодинамічні втрати, забруднення водних ресурсів і утворення золи та шлаку, які потребують спеціального поводження. А у статті Фаргалі та ін (Farghali et al. 2023) акцент зроблено на загрозах, пов'язаних із техногенними аваріями й нестійкістю систем очищення – це зумовлює необхідність впровадження принципів багаторівневої екологічної безпеки.

Система охолодження, що широко застосовується на ТЕС, створює додаткові навантаження на водні екосистеми, зумовлюючи термічне забруднення. Як зазначають Чжоу та Ян (Zhou & Zhang 2023), ТЕС, що працюють на вугіллі, мають один із найвищих рівнів екологічного навантаження протягом усього життєвого циклу: від видобутку палива до утилізації відходів. Це підтверджується результатами аналізу життєвого циклу (LCA, Life Cycle Assessment), які виявляють приховані й прямі втрати у всіх фазах функціонування ТЕС. Таким чином, вплив ТЕС на довкілля є системним і багатofакторним. Він охоплює не лише прямі викиди, а й вторинні екологічні ефекти, що вимагає комплексного підходу: модернізації обладнання, використання чистіших видів палива, впровадження багаторівневого моніторингу та повної оцінки впливу на навколишнє середовище у рамках життєвого циклу виробництва енергії.

Однією з ключових передумов зниження викидів і підвищення екологічної ефективності ТЕС є покращення показників енергоефективності, що безпосередньо пов'язані зі станом обладнання та впровадженням сучасних технологій. Низька енергоефективність є однією з найбільш хронічних проблем теплової енергетики України. Подібні проблеми описано у дослідженні Ялова та Бондар (2021), де показано, що шлакування та забруднення поверхонь нагріву суттєво знижують теплову ефективність котлів і впливають на їх надійність. Більшість ТЕС функціонує на обладнанні, яке вже давно перевищило нормативні строки експлуатації, що зумовлює високі втрати тепла та суттєве зниження ККД. У дослідженні Сосновського Ю.М та Онацького А.І. (Sosnovskiy, Y. M., & Onatskiy, A. I. 2022) зазначають, що ККД багатьох котлів не перевищує 35%, а втрати на транспортування пари та гарячої води сягають 20–30%. Це призводить до надмірного використання палива, підвищення собівартості електроенергії й тарифного тиску на споживачів.

Як зазначають Дзікуц та ін. (Dzikuć et al. 2020), оптимізація режимів горіння вугільного палива дозволяє зменшити втрати тепла та скоротити викиди без повної реконструкції обладнання. Вчений оланреваю (Olanrewaju 2022) наголошує, що модернізація ТЕС має базуватись на впровадженні цифрових систем контролю та оптимізації, що дозволяє значно зменшити непродуктивні витрати енергії. У статті Саїдур та ін (Saidur et al. 2012) акцентовано увагу на необхідності експертичного аналізу як ключового інструменту оцінки втрат і виявлення найбільш неефективних процесів у циклі виробництва електроенергії. Такий підхід забезпечує стратегічне планування енергомодернізації з урахуванням ресурсної та екологічної ефективності.

Згідно з дослідженням Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024), впровадження когенераційних систем – одне з найбільш ефективних рішень. Поєднання виробництва електричної та теплової енергії в одному циклі дозволяє підвищити загальний ККД до 75–80% і водночас зменшити викиди CO<sub>2</sub> на 20–30% порівняно з традиційними схемами генерації. Крім того, когенерація забезпечує більшу гнучкість системи, що особливо важливо в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії. Як вказано в роботі Кабейї та Оланреваю (Kabeyi & Olanrewaju 2022), подальше зволікання з модернізацією не лише шкодить екологічним показникам, а й знижує стійкість енергосистеми в умовах змінного попиту. Автоматизація подачі палива, інтеграція цифрових сенсорів та адаптивне керування параметрами горіння здатні забезпечити більш ефективне використання палива та зниження викидів без необхідності повної реконструкції ТЕС (Цоумаліс та ін. (Tsoumalis et al.), 2022).

Таким чином, підвищення енергоефективності ТЕС є комплексною задачею, яка охоплює технічні, економічні та екологічні аспекти. Її реалізація передбачає системне впровадження цифрових рішень, когенераційних технологій, експертичного аналізу та гнучких стратегій управління паливними потоками.

Ефективне реагування на зазначені виклики потребує впровадження інноваційних технологій, які здатні не лише покращити технічні характеристики ТЕС, а й зменшити їх екологічне навантаження. Модернізація ТЕС є одним із ключових напрямів забезпечення енергетичної безпеки, економічної доцільності та екологічної стійкості України. У роботі Ісмайільзада та ін. (Ismayilzada et al. 2024) акцентовано увагу на сучасних технічних

засобах для генерації теплової енергії, її конверсії та керування потоками, що узгоджується з вектором модернізації, спрямованим на підвищення енергоефективності та зменшення екологічного навантаження. Вона передбачає впровадження сучасних технічних рішень, спрямованих на підвищення енергоефективності, зниження шкідливих викидів та оптимізацію експлуатаційних процесів. Як зазначає Фіалко та ін. (Fialko et al. 2021), системи рекуперації тепла дозволяють повторно використовувати вторинну енергію димових газів, підвищуючи ККД котлів на 10–15% та зменшуючи витрати палива. Було проаналізовано результати практичної реалізації утилізаторів теплоти димових газів на вітчизняних ТЕС (наприклад, Домбровська Т.М. 2021), що підтвердило ефективність таких заходів для зниження питомих витрат палива та зменшення викидів CO<sub>2</sub>.

Цифровізація процесів горіння і дистанційне керування параметрами роботи ТЕС стають важливим фактором зниження втрат і викидів. У статті Цоумаліс та ін. (Tsoumalis et al. 2022) підкреслено, що використання інтелектуальних систем управління дозволяє оптимізувати процес спалювання навіть без капітальної реконструкції, забезпечуючи скорочення викидів на 20–30%. Як вказано в роботі Оланреваю (Olanrewaju 2022), цифрові системи контролю сприяють стабільній роботі обладнання, зменшують вплив людського фактора та підвищують оперативність прийняття рішень.

Особливу увагу заслуговують когенераційні установки з комбінованим виробництвом тепла та електроенергії. Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś i Buketov 2024) зазначають, що ККД таких систем може досягати 80%, а рівень викидів CO<sub>2</sub> зменшується на 20–25% у порівнянні з традиційною генерацією. Також підтверджено ефективність застосування когенерації на об'єктах централізованого теплопостачання, особливо у промислових районах.

Згідно з дослідженням Фаргалі та ін. (Farghali et al. 2023), інноваційний підхід до модернізації ТЕС передбачає інтеграцію стратегічного енергоменеджменту: прогнозування навантажень, адаптивного керування паливними потоками та динамічної оптимізації роботи установок у режимі реального часу. Як підкреслюють Кабейі та Оланреваю (Kabeyi та Olanrewaju 2022), сучасна модернізація ТЕС має бути багаторівневою – від технічного вдосконалення та впровадження низькотемпературних пальників до сертифікації за екологічними стандартами та запровадження LCA-оцінювання життєвого циклу об'єкта.

Таким чином, інноваційні технології модернізації ТЕС охоплюють не лише окремі технічні рішення, а й системні трансформації управлінських, екологічних та енергетичних процесів. Їх широке впровадження є необхідною умовою для досягнення цілей сталого розвитку, декарбонізації та зменшення залежності від імпорتنих енергоресурсів. Одним із логічних напрямів модернізації ТЕС, тісно пов'язаним із підвищенням енергоефективності, є скорочення шкідливих викидів, яке має вирішальне значення для екологічної безпеки.

Однією з ключових екологічних проблем, пов'язаних із роботою ТЕС, є високий рівень викидів забруднювальних речовин: оксидів азоту (NO<sub>x</sub>), сірки (SO<sub>2</sub>), зважених твердих частинок (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) та вуглекислого газу (CO<sub>2</sub>). Зменшення цих викидів є передумовою наближення до європейських екологічних стандартів і забезпечення екологічної безпеки в промислових регіонах України. Згідно з Фаргалі та ін. (Farghali et al. 2023), інтеграція новітніх інженерних рішень дає змогу зменшити викиди забруднювальних речовин на 20–40% навіть за умов часткової модернізації.

Оксиди азоту (NO<sub>x</sub>) утворюються під час високотемпературного горіння, спричиняючи утворення кислотних дощів і фотохімічного смогу. Як зазначено у роботі Крістінссон і Ланг (Kristinsson і Lang 2021), точне регулювання подачі палива й повітря у котлах дозволяє знизити емісію NO<sub>x</sub> на 50–60%. Для досягнення вищого ступеня очищення використовуються технології селективного каталітичного відновлення (SCR) та селективного некаталітичного відновлення (SNCR), ефективність яких може перевищувати 90% (Цоумаліс та ін. (Tsoumalis et al.), 2022).

Щодо оксидів сірки (SO<sub>2</sub>), то сірчисті сполуки утворюються при спалюванні мазуту та вугілля. Згідно з дослідженням Сінгх і Шукла (Singh і Shukla 2014), для зменшення викидів SO<sub>2</sub> найефективнішими є вологі та напівсухі скрубєрні системи, які працюють на вапнякових або магнієвих абсорбентах. Такі технології забезпечують скорочення викидів на 70–95% за умов правильного проектування та обслуговування та підтверджується, що навіть часткова модернізація існуючих систем очищення дозволяє суттєво зменшити концентрацію SO<sub>2</sub> у викидах.

Тверді частинки (PM). Викиди дрібнодисперсного пилу (PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>) є серйозним фактором ризику для здоров'я населення. Фіалко та ін. (Fialko et al. 2021) підкреслюють ефективність електростатичних фільтрів (ESP), які здатні видаляти до 99% зважених частинок. Альтернативою

є тканинні фільтри (рукавні), рекомендовані для котелень на твердому паливі, які демонструють аналогічну ефективність (Буковська та ін. (Bukowska et al.), 2017).

Вуглекислий газ (CO<sub>2</sub>) залишається одним із ключових факторів кліматичних змін. Ефективними стратегіями зменшення його викидів є підвищення ККД обладнання, перехід на альтернативні види палива, зокрема біомасу, а також впровадження когенераційних технологій. Згідно з дослідженням Кабейі і Оланреважу (Kabeyi і Olanrewaju 2022), скорочення викидів CO<sub>2</sub> може бути досягнуте за рахунок модернізації систем тепlopостачання та переходу до низьковуглецевої генерації. Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś і Buketov 2024) вказують, що поєднання виробництва тепла й електроенергії в межах когенераційного циклу дозволяє зменшити викиди CO<sub>2</sub> на 20–30% порівняно з традиційними технологіями. Додатково, Саїдур та ін. (Saidur et al. 2012) підкреслюють, що ексергетичний аналіз допомагає виявити основні джерела енергетичних втрат, оптимізуючи споживання палива та знижуючи вуглецевий слід.

Як зазначають Дрождж, Тось і Букетов (Drożdż, Toś і Buketov 2024), найефективнішим рішенням є поєднання когенераційних технологій із сучасними системами очищення – це дозволяє зменшити викиди NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> та CO<sub>2</sub> на 30–50% та підвищити загальний ККД до 80%. Оланреважу (Olanrewaju 2022) наголошує, що зниження викидів має розглядатися через призму життєвого циклу (LCA): від видобутку палива до утилізації шлаку та золи. Такий підхід дозволяє виявити приховані втрати й оцінити екологічні наслідки кожного етапу енергогенерації. Фаргалі та ін. (Farghali et al. 2023) підкреслюють роль автоматизованих систем екологічного моніторингу, які забезпечують адаптивне

керування процесами горіння та прогнозування екологічних навантажень.

Таким чином, зниження викидів шкідливих речовин на ТЕС вимагає комплексної стратегії, яка об'єднує модернізацію обладнання, трансформацію палива, цифровізацію управління і запровадження систем моніторингу життєвого циклу. Лише такий багаторівневий підхід дозволяє досягти реального покращення якості довкілля та відповідності міжнародним стандартам.

На основі проведеного літературного аналізу та систематизації сучасних підходів до підвищення екологічної ефективності ТЕС визначено ключові технологічні рішення, які вже продемонстрували свою результативність і можуть бути адаптовані в енергетичному секторі України (табл. 1).

Аналіз сучасного стану ТЕС в Україні виявив критичні проблеми: зношеність обладнання, високе екологічне навантаження та недостатній рівень впровадження інновацій. Встановлено, що ключовими напрямками підвищення екологічної ефективності є: рекуперація тепла, використання альтернативного палива, впровадження когенераційних технологій, очищення викидів (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM) та цифрове управління процесами горіння. Результати досліджень підтверджують ефективність комплексного підходу, який дозволяє підвищити ККД установок до 80% та знизити викиди на 20–50%. Така модернізація повинна супроводжуватись державною підтримкою, оновленням нормативної бази та впровадженням оцінки життєвого циклу для забезпечення сталості енергетичної системи.

**Висновки.** Проведений огляд підтвердив, що підвищення екологічної ефективності теплової енергетики є багатокомпонентним завданням, що вимагає поєднання технічних інновацій, зміни паливної політики та вдосконалення управлін-

Таблиця 1

**Основні технологічні рішення для підвищення екологічної ефективності ТЕС**

Технологічне рішення	Підвищення ефективності
Рекуперація тепла та теплообмінні системи	Застосування систем рекуперації тепла дозволяє підвищити ефективність котлоагрегатів на 10–15% завдяки повторному використанню вторинної енергії димових газів
Альтернативні види палива	Зменшення викидів CO <sub>2</sub> , SO <sub>2</sub> і NO <sub>x</sub> завдяки переходу на біомасу або природний газ замість вугілля.
Очищення димових газів	Зниження концентрацій забруднювачів (NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , тверді частинки) до 70–99% за допомогою SCR, скрубберів, електрофільтрів.
Когенераційні установки	Збільшення ККД до 80%; зменшення викидів CO <sub>2</sub> на 20–30% порівняно з традиційними системами.
Автоматизація та цифровізація	Зменшення втрат енергії та обсягів викидів до 30% через застосування сенсорних систем, прогнозування, дистанційного керування.
Інтеграція технологій (комплексний підхід)	Одночасне досягнення екологічного та економічного ефекту; ефективна модернізація можлива за умов підтримки з боку держави та оновлення нормативної бази.

Джерело: сформовано авторами

ських рішень. Аналіз сучасних технологічних підходів свідчить про ефективність використання теплообмінного обладнання та систем рекуперації тепла для зменшення витрат палива. Перехід до менш вуглецевоємних джерел енергії, таких як біомаса та природний газ, забезпечує скорочення парникових викидів, а впровадження когенераційних установок дозволяє підвищити загальну енергетичну ефективність. Технології очищення димових газів – зокрема електрофільтри, скрубери та селективні каталітичні редуктори – значно зменшують викиди шкідливих речовин, а цифровізація процесів управління сприяє стабілізації роботи обладнання та зменшенню втрат енергії.

Разом із тим огляд показує, що для досягнення значущого екологічного ефекту недостатньо впроваджувати окремі технології у відриві від ширшого контексту. Необхідне формування цілісної стратегії модернізації галузі, яка включає адаптацію нормативної бази, стимулювання інвестицій та міждисциплінарну координацію.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з розробкою адаптивних моделей впровадження сучасних технологій на підприємствах різного масштабу, оцінкою їх життєвого циклу, а також формуванням критеріїв економічної доцільності у процесі екологічної трансформації теплової енергетики.

### Список літератури:

1. Bukowska M., Nowak K., Proszak-Miączek D., Rabczak S. Concept of heat recovery from exhaust gases. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 245, № 5. 052057. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052057>
2. Cherednichenko O., Havrysh V., Shebanin V., Kalinichenko A., Mentel G., Nakonieczny J. Local green power supply plants based on alcohol regenerative gas turbines: economic and environmental aspects. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 9. 2156. <https://doi.org/10.3390/en13092156>
3. Dobre C., Costin M., Constantin M. A review of available solutions for implementation of small–medium combined heat and power (CHP) systems. *Inventions*. 2024. Vol. 9, № 4. 82. <https://doi.org/10.3390/inventions9040082>
4. Drożdż M., Toś P., Buketov, V. Aspects of developing an innovative, energy-efficient, low-emission co-generator. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2024. № 5. С. 71–78. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2024-5/071>
5. Dzikuć M., Kuryło P., Dudziak R., Szufa S., Dzikuć M., Godzisz K. Selected aspects of combustion optimization of coal in power plants. *Energies*. 2020. Vol. 13, № 9. 2208. <https://doi.org/10.3390/en13092208>
6. Eze V. H. U., Tamball J. S., Uzoma O. F., Sarah I., Robert O., Okafor W. O. Advancements in energy efficiency technologies for thermal systems: a comprehensive review. *INOSR Applied Sciences*. 2024. Vol. 12, № 1. P. 1–20. <https://doi.org/10.59298/INOSRAS/2024/1.1.1010>
7. Farghali M., Osman A. I., Mohamed I. M. A., Rooney D. W., Ahmed A. I. Strategies to save energy in the context of the energy crisis. *Energy Efficiency*. 2023. Vol. 16. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01591-5>
8. Fialko N.M., Navrodska R.O., Shevchuk S.I., Stepanova A.I. Improvement of environmental conditions by applying heat recovery technologies of boiler plants. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2021. № 6. P. 148–157. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2021-6/148>
9. Ismayilzada M., Abbasova S., Novruzova U., Safarova T. Study of technical means for heat generation, its application, flow control, and conversion of other types of energy into thermal energy. *Energy Harvesting and Systems*. 2024. Vol. 11. Article 20230125. <https://doi.org/10.1515/ehs-2023-0125>
10. Kabeyi M. J. B., Olanrewaju O. A. Sustainable energy transition for renewable and low carbon grid electricity generation and supply. *Frontiers in Energy Research*. 2022. Vol. 9. Article 743114. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
11. Карпенко І. М., Нікітін Є. Є., Басок Б. І. та ін. Стан та шляхи розвитку систем централізованого теплопостачання в Україні. У двох книгах. Книга 2. Київ : Наукова думка. 2022.
12. Kristinsson H., Lang S. Boiler control: improving efficiency of boiler systems: master's thesis. Lund: Lund University, Faculty of Engineering, Division of Industrial Electrical Engineering and Automation. 2011. URL: <http://lup.lub.lu.se/student-papers/record/3632662>
13. Lee H., Lee M.-J. Recent advances in ammonia combustion technology. *Energies*. 2021. Vol. 14, № 18. 5604. <https://doi.org/10.3390/en14185604>
14. Ministry of Energy of Ukraine. Report on the implementation status of the National Emissions Reduction Plan for large combustion plants in 2023. 2023. URL: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2024/03/Rozmishhennya-Zvit-po-vykonannyyu-NPD-za-2023.pdf>
15. Ministry of Environmental Protection and Natural Resources of Ukraine. Updated nationally determined contribution of Ukraine to the Paris Agreement. 2021. URL: [https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Ukraine%20NDC\\_July%2031.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2022-06/Ukraine%20NDC_July%2031.pdf)
16. Домбровська Т.М. Theoretical and methodological principles of the paradigm of sustainable development: energy component. *Black Sea Economic Studies*. 2021. Issue 72-1. DOI: 10.32843/bses.72-3. URL (PDF): [https://bses.in.ua/journals/2021/72\\_1\\_2021/5.pdf](https://bses.in.ua/journals/2021/72_1_2021/5.pdf)

17. Риндюк Д. В., Шелешей Т. В., Беднарська І. С., Беднарська Я. С. Оцінка впливу марки мазуту на викиди сірчистого ангідриду на енергетичних об'єктах. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2020. Т. 31 (70), С. 231–236. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.2-1/36>
18. Saidur R., Mekhilef S., BoroumandJazi G., Mohammed H. A. A review on exergy analysis of biomass based fuels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, Iss. 2. P. 1217–1222. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.076>
19. Siemens AG. Boiler solutions. N.d. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/buildings/hvac/oem/boiler-solutions.html>
20. Сосновський Ю. М., Онацький А. І. Enhancing the efficiency of heat and power production in district heating systems based on thermal power plants. *Energy: Technology, Economics, Ecology*. 2022. № 1. С. 43–52.
21. Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок. *Методика визначення*. ГКД 34.02.305-2002. Київ : ОЕП «ГРІФРЕ». URL: [https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/vikidi\\_zabrudnyvalnikh\\_rechovin-3-27842.pdf](https://zakon.isu.net.ua/sites/default/files/pdf/vikidi_zabrudnyvalnikh_rechovin-3-27842.pdf)
22. Tsoumalis G. I., Vampos Z. N., Chatzis G. V., Biskas P. N. Overview of Natural Gas Boiler Optimization Technologies and Potential Applications on Gas Load Balancing Services. *Energies*. 15(22), 8461. <https://doi.org/10.3390/en15228461>
23. United Nations Framework Convention on Climate Change. Ukraine deposits instrument of ratification of Paris Agreement. 2016. URL: <https://unfccc.int/news/ukraine-deposits-instrument-of-ratification-of-paris-agreement>
24. Varlamov G. B., Romanova K. A., Nazarova I., Daschenko 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>
25. Singh R., Shukla A. A review on methods of flue gas cleaning from combustion of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014. Vol. 29. P. 854–864. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.005>
26. Ялова А.М., Бондар Н. В. Вплив шлакування та забруднення поверхонь нагріву на надійність роботи твердопаливних котлів на тес. Вісник Криворізького національного університету. 2021. Т. 19 (2). С. 151–157. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2021-1-53-151-157>
27. Замулко А. І., Довгаль М. О. Аналіз перспектив розвитку ТЕС в умовах інтеграції в європейський простір: монографія. Київ : Політехніка. 2023.
28. Zhou Y., Zhang L., Li H. On the evaluation of the “coal-to-gas”: A life cycle cost analysis. *Energy for Sustainable Development*. 2023. Vol. 73. P. 116–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.01.009>
29. Beztsenyi I. V., Bondzyk D. L., Shchudlo T. S., Dunayevska N. I. Obtaining kinetic characteristics of combustion of the coke from solid biofuels. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. №. 6. P. 15–20. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/015>

#### Usov I.L., Sheleshey T.V. IMPROVING THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THERMAL POWER PLANTS: ANALYSIS OF EMISSION TREATMENT TECHNOLOGIES AND MODERNISATION APPROACHES

*The growing environmental threat caused by emissions from thermal power plants necessitates the search for solutions to reduce their negative impact on the environment. Thermal power generation remains one of the main sources of air pollution and greenhouse gas emissions.*

*The aim of this study was to systematically summarize scientific and technical approaches to improving the environmental efficiency of thermal power plants (TPPs) based on a review of more than 35 scientific publications from Scopus, Web of Science, and domestic publications, as well as computer modeling of emissions for 500 MW coal-fired boilers. Six key technological solutions were analyzed. The introduction of heat recovery systems and contact heat exchangers increases the thermal efficiency of boiler units by 10–15%, which ensures the reuse of secondary energy from flue gases. The transition to alternative fuels (biomass, natural gas, or a combination thereof) reduces CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, and NO<sub>x</sub> emissions by an average of 20–30% compared to coal. Flue gas cleaning using SCR systems, scrubbers, and electrostatic precipitators can reduce NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, and particulate matter concentrations by 70–99%, depending on the equipment configuration. The use of cogeneration plants increases overall efficiency to 80% and reduces CO<sub>2</sub> emissions by 20–30% compared to standard technologies, while automation and digital process control contribute to an additional reduction in energy costs and pollution of up to 30%. The comprehensive integration of these approaches allows for simultaneous environmental and economic benefits, provided that there is support from the state and a regulatory framework in place. The practical value of this work lies in the formation of quantitative indicators of the effectiveness of each solution and the development of a roadmap for the modernisation of Ukrainian thermal power plants, taking into account sustainable development standards.*

**Key words:** energy efficiency, flue gases, cogeneration, fuel combustion technologies, combustion process automation, environmental standards.

Дата надходження статті: 30.11.2025

Дата прийняття статті: 18.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025