

УДК 628.4:504.06

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.4\(502\).18](https://doi.org/10.15589/znп2025.4(502).18)

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF FACTORS CONTRIBUTING TO THE FORMATION OF HARMFUL SUBSTANCES AT THERMAL POWER PLANTS

КОМПЛЕКСНИЙ АНАЛІЗ ФАКТОРІВ УТВОРЕННЯ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН НА ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

Tetina V. Sheleshey

Sheleshey_tanya@ukr.net

ORCID: 0000-0002-7242-4107

Ivan L. Usov

usov.ivan99@gmail.com

ORCID: 0009-0001-5690-9446

Т. В. Шелешей,

канд. техн. наук, доцент

І. Л. Усов,

аспірант

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv
«Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», м. Київ

Abstract. Objective. The objective of the study is to comprehensively assess the impact of operational and technological factors on the formation of harmful emissions from thermal power plant power units and to identify effective ways to reduce them, taking into account current environmental requirements.

Methodology. To achieve the set goal, a comprehensive methodology was applied, including experimental measurements of NO_x , SO_2 and CO concentrations in power unit flue gases under various operating modes, as well as statistical analysis. Preliminary data processing was carried out with verification of abnormal values, normalisation of indicators and assessment of the impact of combustion temperature, load, excess air and fuel composition on emission levels.

Results. It has been established that an increase in combustion temperature above 1200–1300 °C contributes to the intensive formation of NO_x , while the concentration of SO_2 is determined mainly by the sulphur content in the fuel. An increase in the power unit load leads to an increase in NO_x and a decrease in CO under conditions of more complete combustion. The optimal air excess range $\alpha \approx 1,1\text{--}1,3$ ensures process stability and minimal CO and particulate emissions. It has been shown that high fuel moisture reduces the combustion temperature and increases dust and CO formation.

Scientific novelty. The scientific novelty lies in the comprehensive quantitative assessment of the impact of operational and fuel factors on the formation of the main harmful emissions of thermal power plants and the establishment of their interrelationships based on regression analysis.

Practical significance. The results obtained can be used to optimise the operating modes of TPP power units, select effective flue gas cleaning technologies and reduce the negative impact on atmospheric air without reducing the energy efficiency of electricity production.

Key words: thermal power plants; NO_x ; SO_2 ; CO; excess air; combustion temperature; fuel composition.

Анотація. Мета. Метою дослідження є комплексна оцінка впливу експлуатаційних та технологічних факторів на формування викидів шкідливих речовин енергоблоками теплових електростанцій та визначення ефективних шляхів їх зменшення з урахуванням сучасних екологічних вимог.

Методика. Для досягнення поставленої мети застосовано комплексну методику, що включає експериментальні вимірювання концентрацій NO_x , SO_2 та CO у димових газах енергоблоків при різних режимах роботи, статистичний аналіз. Проведено попередню обробку даних з перевіркою аномальних значень, нормалізацією показників і оцінкою впливу температури згоряння, навантаження, надлишку повітря та складу палива на рівень викидів.

Результати. Встановлено, що підвищення температури згоряння понад 1200–1300 °C сприяє інтенсивному утворенню NO_x , тоді як концентрація SO_2 визначається переважно вмістом сірки в паливі. Збільшення навантаження енергоблоку призводить до зростання NO_x і зменшення CO за умов повнішого згоряння. Оптимальний діапазон надлишку повітря $\alpha \approx 1,1\text{--}1,3$ забезпечує стабільність процесу та мінімальні викиди CO і твердих часток. Показано, що висока вологість палива знижує температуру горіння та збільшує утворення пилу і CO.

Наукова новизна. Наукова новизна полягає у комплексній кількісній оцінці впливу режимних і паливних факторів на формування основних шкідливих викидів ТЕС та встановленні їх взаємозв'язків на основі регресійного аналізу.

Практична значимість. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів роботи енергоблоків ТЕС, вибору ефективних технологій очищення димових газів та зменшення негативного впливу на атмосферне повітря без зниження енергоефективності виробництва електроенергії.

Ключові слова: теплові електростанції; NO_x ; SO_2 ; CO ; надлишок повітря; температура згоряння; склад палива.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Забруднення атмосферного повітря є однією з найактуальніших екологічних проблем сучасності. Воно негативно впливає на стан здоров'я населення, сприяє розвитку респіраторних, серцево-судинних та онкологічних захворювань, а також погіршує якість навколишнього середовища. Особливо гостро проблема стоїть у промислових регіонах та великих містах, де спостерігається висока концентрація шкідливих речовин, що перевищує допустимі норми. Крім того, забруднення повітря має глобальні наслідки, впливаючи на зміну клімату та підвищення частоти аномальних метеорологічних явищ.

Основними джерелами викидів шкідливих речовин є енергетичний сектор, транспорт, промисловість та комунальне господарство. В енергетиці, зокрема на теплоелектростанціях і котельнях, спостерігається викид оксидів азоту, сірки, вуглекислого газу та аерозольних часток. Транспортний сектор, що використовує бензин та дизельне паливо, є джерелом вуглекислого газу, монооксиду вуглецю, оксидів азоту та летких органічних сполук. Промислові підприємства, особливо металургійні, хімічні та цементні, генерують значні обсяги токсичних речовин, включно з важкими металами. Комунальне господарство, зокрема спалювання твердих побутових відходів і робота котелень, також сприяє забрудненню повітря.

Зростання концентрацій шкідливих речовин у атмосфері обумовлене не лише кількістю викидів, а й їхнім взаємним впливом та режимними параметрами роботи джерел. Наприклад, на утворення оксидів азоту значний вплив має надлишок повітря та навантаження енергетичних об'єктів. Розуміння цих взаємозв'язків дозволяє більш точно прогнозувати рівень забруднення та ефективніше планувати заходи щодо його зменшення.

Метою даного дослідження є комплексна оцінка впливу основних джерел забруднення на якість атмосферного повітря та виявлення ключових факторів, що визначають інтенсивність викидів шкідливих речовин. Для досягнення цієї мети поставлено наступні завдання: провести аналіз основних джерел викидів; визначити залежність концентрацій шкідливих речовин від режимних параметрів енергетичних об'єктів; оцінити вплив надлишку повітря та навантаження на утворення оксидів азоту; розробити рекомендації щодо зменшення шкідливих викидів.

Отримані результати мають практичне значення для оптимізації режимів роботи енергетичних підприємств, планування екологічних заходів у містах і промислових районах, а також для розробки

стратегій зменшення впливу на навколишнє середовище та поліпшення якості життя населення.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Сучасні дослідження у сфері теплової енергетики значну увагу приділяють зменшенню викидів шкідливих речовин, зокрема NO_x , SO_2 та CO_2 , шляхом оптимізації режимних параметрів, модернізації обладнання та впровадження інноваційних технологій контролю.

Вплив експлуатаційних режимів на формування викидів є одним із ключових напрямів дослідження [1] показали, що регулювання надлишку повітря та температури згоряння у циркулюючому киплячому шарі дозволяє суттєво зменшити викиди NO_x і SO_2 . Подібні результати отримали [2], які за допомогою моделювання встановили, що коливання навантаження котлів безпосередньо впливають на інтенсивність утворення оксидів азоту та сірки. Дослідження [3] розвиває цю тематику, пропонуючи метод прогнозування концентрації NO_x при змінному навантаженні, що дає змогу оптимізувати режими роботи котлів у реальному часі.

Водночас значна частина наукових праць присвячена технологічним аспектам очищення викидів [4] провели комплексний огляд технологій селективного каталітичного відновлення (SCR) та десульфурзації, відзначивши їхню високу ефективність при коректній інтеграції у технологічний процес. Порівняльний аналіз різних систем контролю забруднення, здійснений [5], підтверджує, що поєднання декількох технологій дає найкращі результати для зниження NO_x , SO_2 та пилу.

Інший напрям досліджень пов'язаний з декарбонізацією енергетики та оцінкою вуглецевого сліду. Дослідження [6] проаналізували вплив паливної структури китайських ТЕС на рівень викидів CO_2 і NO_x , вказуючи на потенціал заміни частини вугілля природним газом або біомасою. Подібні висновки роблять [7], які довели, що комбінація технологій уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) із біомасовим спалюванням може суттєво скоротити загальні парникові викиди. У цьому ж контексті [8] та [9] досліджують шляхи досягнення нульових і навіть негативних викидів, підкреслюючи технічну та економічну доцільність впровадження біоенергетичних і вуглецевих технологій у ТЕС.

Значну увагу сучасна наука приділяє цифровим і аналітичним методам моніторингу [10] розробили методику оцінки вуглецевих викидів на основі

мультимодальних та супутникових даних, що підвищує точність контролю стану атмосферного повітря. Подібно дослідники [11] запропонували інтегрований підхід, який поєднує супутникові та наземні спостереження для комплексної оцінки впливу ТЕС на довкілля.

Ще один перспективний напрямок – автоматизація та інтелектуальне управління процесами згоряння [12] показали, що впровадження інтелектуальних систем управління котлами дозволяє одночасно підвищити енергоефективність і знизити рівень викидів. Аналогічно дослідження [13] наголошують на важливості адаптивного управління газовими енергоблоками, оскільки їхня гнучкість безпосередньо впливає на рівень забруднення повітря.

Практичне підтвердження позитивного ефекту модернізації енергетичних об'єктів наведено у роботі [14], які на прикладі італійських підприємств EMAS довели зниження екологічних показників після оновлення обладнання. Базові емісійні характеристики для моделювання викидів у різних умовах наведені у дослідженні [15], що забезпечує надійне емпіричне підґрунтя для сучасних моделей прогнозування забруднення.

Отже, аналіз літератури свідчить, що ключовими тенденціями у зменшенні викидів ТЕС є: оптимізація режимних параметрів горіння; інтеграція технологій очищення газів; перехід до низьковуглецевих і біопаливних систем; розвиток інтелектуальних систем управління; використання супутникових технологій для моніторингу.

Загалом, сучасні дослідження демонструють міждисциплінарний підхід, що поєднує енергетичну ефективність, екологічну безпеку та цифрові інновації як основні чинники сталого розвитку теплової енергетики.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Незважаючи на значну увагу до окремих аспектів зменшення викидів ТЕС (наприклад, оптимізація окремих параметрів або застосування кінцевих технологій очищення), комплексна оцінка взаємозалежного впливу всіх ключових експлуатаційних та технологічних факторів (температури, навантаження, надлишку повітря та складу палива) на формування шкідливих викидів в умовах реальної експлуатації залишається невирішеною загальною проблемою. Розуміння цих складних взаємозв'язків необхідне для точного прогнозування забруднення та ефективного планування заходів щодо його зменшення, що й обумовило необхідність даного дослідження.

На основі аналізу літератури сформульовані ключові завдання дослідження:

1. Вивчити вплив режимних параметрів роботи енергоблоків ТЕС (температура згоряння,

навантаження, склад палива, надлишок повітря) на рівень викидів NO_x і SO_2 .

2. Оцінити ефективність сучасних технологій зменшення викидів, таких як SCR, десульфурація та фільтрація, у реальних умовах експлуатації.

3. Розробити рекомендації щодо оптимізації режимів роботи ТЕС для зменшення шкідливого впливу на атмосферне повітря.

4. Запропонувати методологію моніторингу та прогнозування концентрацій шкідливих речовин із використанням сучасних методів моделювання та даних супутникових спостережень. Мета та задачі дослідження

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою даного дослідження є комплексна оцінка впливу експлуатаційних та технологічних факторів на формування викидів шкідливих речовин від енергоблоків теплових електростанцій та визначення оптимальних стратегій зменшення цих викидів з урахуванням сучасних технологій очищення димових газів.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі задачі:

1. Аналіз впливу режимних параметрів роботи котлів ТЕС (температура згоряння, надлишок повітря, навантаження енергоблоків) на утворення оксидів азоту (NO_x) та сірки (SO_2)

2. Дослідження впливу складу та вологості палива на утворення пилу та летких органічних сполук, що надходять у атмосферу.

3. Розробка рекомендацій щодо оптимізації режимів роботи ТЕС та впровадження технологій очищення димових газів для зменшення негативного впливу на атмосферне повітря.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є процеси утворення шкідливих викидів від енергоблоків теплових електростанцій при різних експлуатаційних та технологічних режимах роботи. До уваги беруться такі фактори, як режим роботи котлів, температура згоряння, надлишок повітря, навантаження енергоблоків, склад та вологість палива.

Гіпотеза дослідження полягає у тому, що оптимізація експлуатаційних параметрів енергоблоків ТЕС дозволяє значно зменшити рівень викидів шкідливих речовин та забезпечити покращення якості атмосферного повітря, не погіршуючи енергоефективності станцій.

Для дослідження впливу експлуатаційних та технологічних факторів на формування викидів шкідливих речовин від енергоблоків ТЕС застосовується комплексна методика, яка включає експериментальні вимірювання, статистичний аналіз та регресійне моделювання.

Концентрації NO_x , SO_2 та CO_2 вимірюються у димових газах енергоблоків при різних режимах

роботи котлів, різному навантаженні, надлишку повітря та складі палива. Використовуються стандартні методи газоаналізу та датчики пилу, що забезпечують високу точність вимірювань.

Попередня обробка даних включає перевірку на наявність пропущених або аномальних значень та нормалізацію даних для порівняння результатів між різними енергоблоками та режимами роботи.

Оцінка впливу кожного фактора (температура згоряння, надлишок повітря, навантаження, склад палива) на концентрацію NO_x , SO_2 та CO_2 .

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Температура процесу згоряння є одним із найважливіших чинників, що визначають склад і кількість газоподібних продуктів, які утворюються під час роботи котельних агрегатів. Від рівня температури в топці залежить інтенсивність хімічних реакцій окиснення, ступінь повноти згоряння палива та

співвідношення між окремими видами шкідливих речовин.

Під час зміни навантаження енергоблоку змінюються основні параметри горіння палива – температура в топці, витрата повітря, тиск та інтенсивність теплообміну. Це безпосередньо впливає на утворення та концентрацію шкідливих речовин у димових газах.

Для наочності впливу надлишку повітря (α) на утворення шкідливих речовин наведено графічне відображення експериментальних даних. На графіку показано, як змінюється концентрація оксидів азоту (NO_x), чадного газу (CO) та твердих часток (сажі) при різних значеннях α .

Склад палива є одним із ключових факторів, що визначають кількість і склад шкідливих речовин, що утворюються під час його спалювання. Основними компонентами палива, які впливають на утворення викидів, є вуглець, водень, сірка та зола.

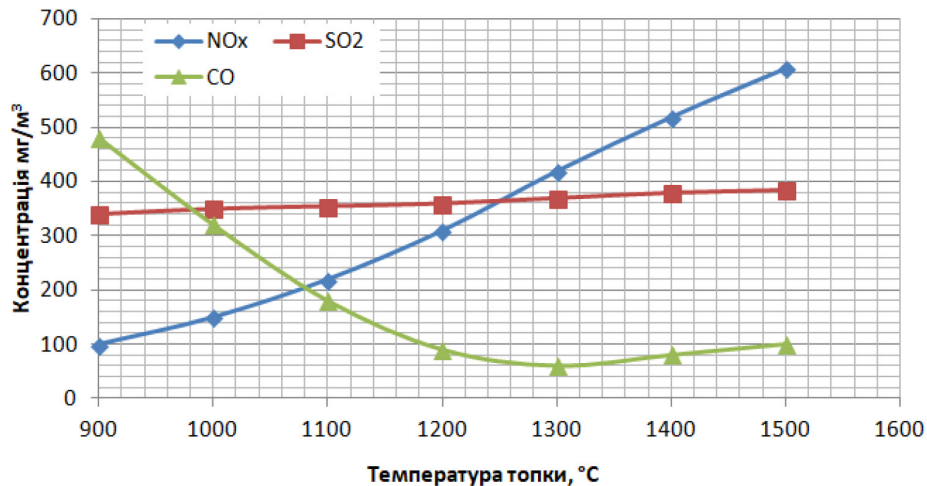


Рис. 1. Температурна залежність викидів оксидів азоту, сірки та чадного газу при спалюванні палива

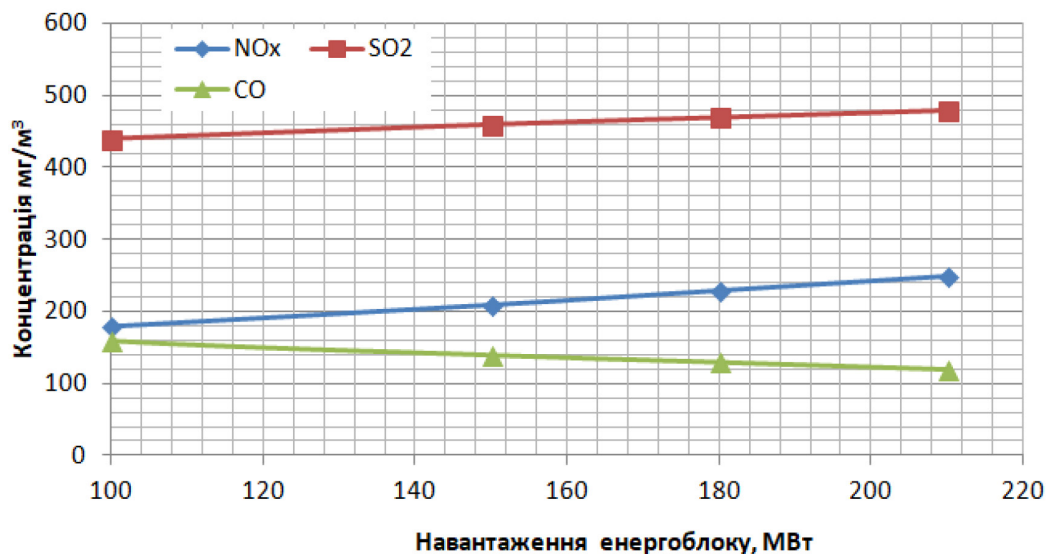


Рис. 2. Залежність концентрації NO_x , SO_2 і CO від навантаження енергоблоку

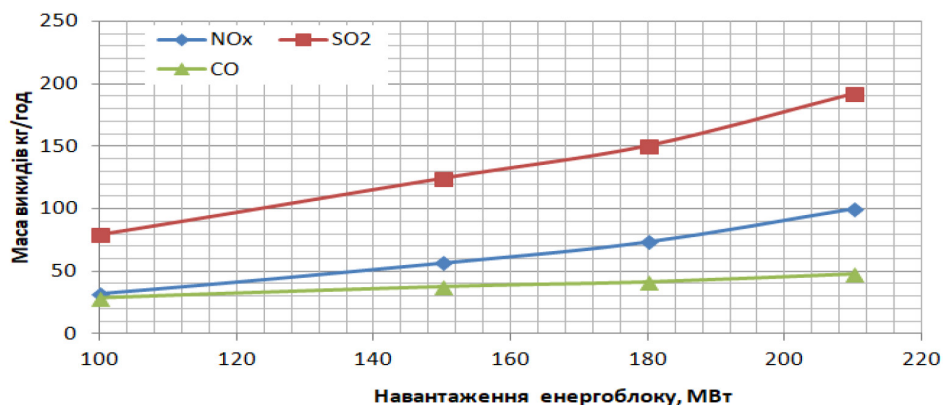
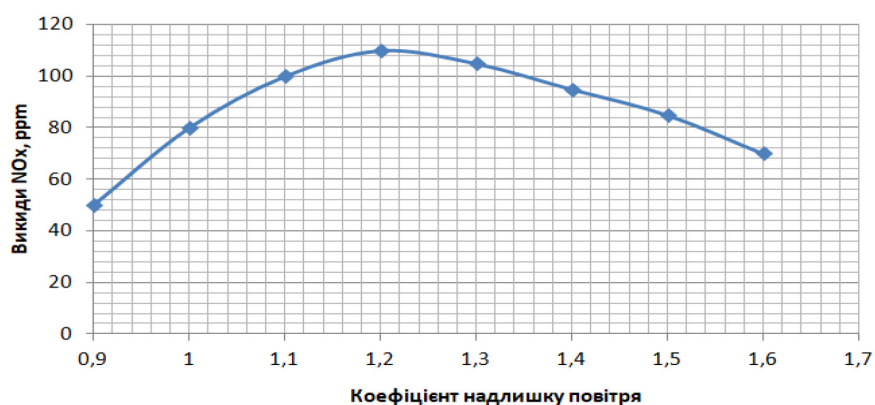
Рис. 3. Залежність маси викидів NO_x , SO_2 і CO від навантаження енергоблоку

Рис. 4. Залежність викидів оксидів азоту від коефіцієнту надлишку повітря

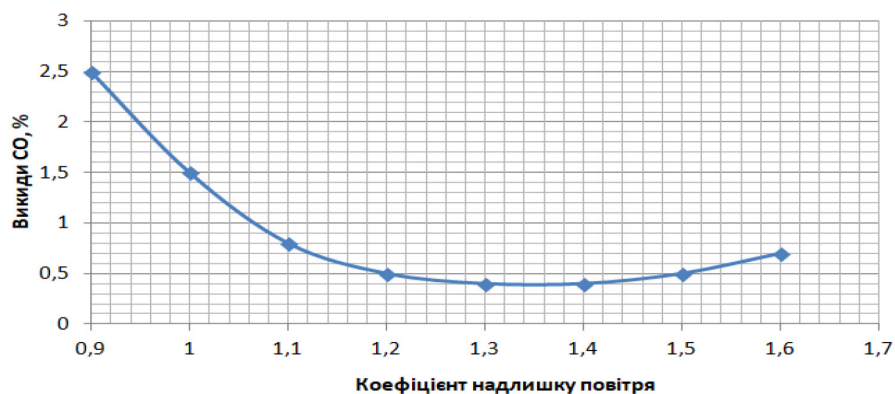


Рис. 5. Залежність викидів чадного газу від коефіцієнту надлишку повітря

Таблиця 1. Вплив складу палива на викиди шкідливих речовин

Параметр палива	Основний вплив на викиди	Коментарі
Вміст сірки	SO_2	Зменшення сірки знижує SO_2 ; біомаса як добавка ефективна
Вміст азоту	NO_x	Високий азот → більше NO_x ; контроль температури горіння критичний
Леткі речовини	NO_x , CO_2	Високий вміст летких речовин → інтенсивне горіння, пікові NO_x і CO_2
Калорійність	CO_2	Вища калорійність → більша температура → збільшення утворення CO_2
Вологість	NO_x , CO , пил	Висока вологість → зниження температури горіння, зменшення NO_x , збільшення пилу та CO

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що формування викидів шкідливих речовин на ТЕС має багатофакторний характер і визначається взаємодією температури згорання, навантаження енергоблоку, коефіцієнта надлишку повітря та складу палива. Отримані залежності підтверджують можливість цілеспрямованого зниження викидів NO_x , SO_2 і CO шляхом оптимізації режимів горіння та контролю паливних характеристик. Це створює науково обґрунтовану основу для підвищення екологічної безпеки теплових електростанцій без погіршення їх енергоефективності.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Зі збільшенням температури топки (рисунк 1) концентрація оксидів азоту (NO_x) різко зростає. Таким чином, при підвищенні температури з 900 до 1500 °C концентрація NO_x може зрости у декілька разів – від 100 до 600 мг/м³.

Оксиди сірки (SO_2), навпаки, менш чутливі до температури процесу згорання. Їх кількість переважно визначається вмістом сірки у паливі.

Таким чином, оптимізація температури згорання є одним із ключових напрямів зменшення шкідливих викидів при спалюванні палива, що сприяє підвищенню енергоефективності та екологічної безпеки теплових електростанцій.

При підвищенні навантаження енергоблоку (рисунки 2 і 3) зростає температура згорання палива, що призводить до інтенсивнішого утворення оксидів азоту (NO_x). Їх концентрація зростає майже пропорційно навантаженню, оскільки збільшується об'єм палива, який згорає, та активізуються термічні реакції між азотом і киснем повітря.

Концентрація оксидів сірки (SO_2), навпаки, змінюється незначно, оскільки визначається вмістом сірки в самому паливі. Зі збільшенням навантаження можливе невелике зростання викидів через вищу повноту спалювання і більший обсяг димових газів, але ця зміна залишається відносно стабільною.

Для чадного газу (CO) спостерігається протилежна тенденція. При малих навантаженнях через знижену температуру топки та неповне згорання палива його концентрація є підвищеною. У міру зростання навантаження, коли процеси горіння стають повнішими, вміст CO у відхідних газах зменшується. Проте при надмірному збільшенні навантаження можливе повторне зростання концентрації CO через локальні зони дефіциту кисню.

Отже, оптимальний діапазон роботи енергоблоку, за якого досягається мінімальна сумарна кількість шкідливих викидів, знаходиться у зоні середніх навантажень. У цьому режимі забезпечується повне спалювання палива при ще не надто високих температурах, що обмежує інтенсивність утворення NO_x .

З графіка видно (рисунк 4), що існує певний оптимальний діапазон надлишку повітря, при якому забезпечується максимальна ефективність згорання палива та мінімальні викиди небезпечних речовин.

Концентрація оксидів азоту (NO_x) зростає при збільшенні α від 0,9 до 1,2, досягаючи максимуму близько 110 ppm. Це пояснюється тим, що помірний надлишок повітря підвищує температуру полум'я, що сприяє інтенсивному окисненню азоту в повітрі. Далі, при подальшому збільшенні α понад 1,3, концентрація NO_x знижується через охолодження полум'я і розведення газів холодним повітрям.

Вміст чадного газу (CO) і твердих часток (сажі) (рисунк 5) зменшується зі зростанням α від 0,9 до 1,2–1,3. Це пояснюється тим, що надлишок повітря забезпечує більш повне згорання палива, знижуючи утворення неповністю окислених продуктів. При дуже великому α (>1,5) температура полум'я знижується, що спричиняє незначне зростання CO та сажі.

Таким чином, існує оптимальний діапазон надлишку повітря ($\alpha \approx 1,1\text{--}1,3$), при якому забезпечується повне згорання палива з мінімальними викидами CO і твердих часток, але з певним збільшенням NO_x . Для практичних енергетичних установок важливо підтримувати α у цьому діапазоні, балансує ефективність спалювання та екологічні показники.

Як видно з Таблиці 1, склад палива має прямий зв'язок із викидами: вміст сірки та азоту безпосередньо корелює з концентрацією SO_2 та NO_x відповідно, тоді як висока вологість негативно впливає на повноту згорання.

Вуглець і водень визначають кількість CO_2 , CO та інших органічних сполук, що утворюються при згоранні. Паливо з високим вмістом вуглецю і низьким вмістом водню зазвичай спричиняє більший викид CO та сажі при неповному згоранні, особливо за недостатнього надлишку повітря.

Сірка у складі палива безпосередньо впливає на утворення оксидів сірки (SO_2 , SO_3). Чим більший вміст сірки, тим вищий рівень викидів SO_2 , що є шкідливим для довкілля та може призводити до кислотних дощів.

Зола та мінеральні домішки впливають на температуру горіння та утворення твердих часток. Палива з високим вмістом золи часто спричиняють підвищене утворення твердих часток і сажі, а також можуть знижувати ефективність згорання.

Таким чином, паливо з низьким вмістом сірки, помірним вуглецевим складом і мінімальною кількістю мінеральних домішок забезпечує найменші викиди шкідливих речовин при ефективному згоранні. Контроль складу палива разом із оптимізацією режиму горіння є важливим заходом для зниження шкідливого впливу енергетичних установок на довкілля.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження встановлено, що утворення шкідливих викидів від енергоблоків теплових електростанцій залежить від комплексу експлуатаційних і технологічних факторів, серед яких температура згоряння, навантаження енергоблоків, надлишок повітря та склад палива.

1. **Температура згоряння** є ключовим фактором утворення NO_x : її підвищення понад 1200–1300 °C активізує термічний механізм утворення оксидів азоту, тоді як оптимальний діапазон 1100–1250 °C забезпечує повне згоряння палива при мінімальному утворенні CO . Концентрація SO_2 визначається переважно вмістом сірки в паливі, тоді як CO має нелінійну залежність від температури.

2. **Навантаження енергоблоку** прямо впливає на концентрацію NO_x : із збільшенням навантаження зростає температура горіння і інтенсивність термічних реакцій азоту з киснем. При цьому концентрація CO зменшується, оскільки забезпечується повніше згоряння палива. SO_2 змінюється незначно, оскільки її викиди залежать від сірчаного складу палива.

3. **Надлишок повітря (α)** має оптимальний діапазон 1,1–1,3. При цьому забезпечується ефективне згоряння палива та мінімальні викиди CO і сажі, водночас концентрація NO_x залишається контрольованою. Надмірний або недостатній α веде до підвищення шкідливих викидів.

4. **Склад палива** суттєво впливає на формування шкідливих речовин: високий вміст сірки збільшує SO_2 , високий азот – NO_x , велика калорійність – CO_2 , а висока вологість палива знижує температуру горіння та збільшує утворення пилу і CO . Палива з низьким вмістом сірки, помірним вуглецевим складом і мінімальною кількістю мінеральних домішок забезпечують найменші викиди при ефективному згорянні.

Отже, для зменшення шкідливого впливу на атмосферу повітря необхідно поєднувати контроль складу палива, оптимізацію режимних параметрів роботи котлів і навантаження енергоблоків, а також застосовувати сучасні технології очищення димових газів (SCR, десульфуратія, фільтрація). Комплексний підхід дозволяє забезпечити баланс між енергоефективністю ТЕС та екологічною безпекою, що є ключовим завданням для сталого розвитку енергетичного сектору.

REFERENCES

- [1] Wang, C., Song, G., Chen, R., Jiang, Y., & Lyu, Q. (2023). Influence of operating parameters on NO_x and SO_2 emissions in circulating fluidized bed with post-combustion. *Journal of Thermal Science*, 32(5), 1858–1867. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1856-1>
- [2] Firoz, A., & Rahman, S. (2025). Modeling the impact of load variation on NO_x and SO_2 formation in thermal power plants. *Energy Reports*, 14, 984–996. <https://doi.org/10.2139/ssrn.538037>
- [3] Wu, J., Li, P., & Zhang, X. (2023). Prediction of NO_x emissions from coal-fired boilers under variable load conditions. *Fuel Processing Technology*, 247, Article 107984. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107984>
- [4] Deng, J., Liu, Z., & Zhang, W. (2021). A comprehensive review of NO_x and SO_2 reduction technologies in thermal power plants. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125734>
- [5] Asghar, M., & Zhang, T. (2021). Comparative analysis of modern emission control technologies in thermal power generation. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101850. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101850>
- [6] Liu, X., Wang, Q., & Zhao, Y. (2022). Carbon footprint of Chinese thermal power plants: Influence of fuel mix on CO_2 and NO_x emissions. *Applied Energy*, 308, 118291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118291>
- [7] Arasto, A., & Sipilä, K. (2014). Reducing CO_2 emissions in power generation with CCS and biomass co-firing technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.03.004>
- [8] Quang, T. H., & Nguyen, M. L. (2023). Pathways to zero and negative emissions in thermal energy using biomass and CCS technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113485>
- [9] Du, H., & Zhang, L. (2021). Technical and economic feasibility of zero and negative emission technologies in thermal energy. *Energy*, 233, 121004. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121004>
- [10] Bu, Y., & Zhang, X. (2025). Assessment of carbon emissions from thermal power plants using multimodal and satellite data. *Energy Informatics*, 8(2), 45–59. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00352-1>
- [11] Li, J., & Zhang, Q. (2024). Estimation of power plant emissions using integrated satellite and ground-based data. *Remote Sensing of Environment*, 303, 113904. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113904>
- [12] Liu, J., & Zhang, R. (2025). Intelligent boiler control systems for emission reduction in power plants. *Energy and AI*, 15, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100299>
- [13] Gonzalez-Salazar, M. A., & Silva, C. (2018). Flexibility of gas-fired power plants and its environmental implications. *Energy Policy*, 123, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.024>
- [14] Castelluccio, M., & Bianchi, F. (2025). Environmental performance of EMAS-registered power facilities in Italy: Impact of modernization. *Journal of Environmental Management*, 355, 117982. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.117982>
- [15] Nazari, S., & Mohammadi, A. (2010). Experimental determination of CO_2 , SO_2 , and NO_x emission factors from Iranian thermal power plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(15), 1430–1439. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.035>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Wang, C., Song, G., Chen, R., Jiang, Y., & Lyu, Q. (2023). Influence of operating parameters on NO_x and SO₂ emissions in circulating fluidized bed with post-combustion. *Journal of Thermal Science*, 32(5), 1858–1867. <https://doi.org/10.1007/s11630-023-1856-1>
- [2] Firoz, A., & Rahman, S. (2025). Modeling the impact of load variation on NO_x and SO₂ formation in thermal power plants. *Energy Reports*, 14, 984–996. <https://doi.org/10.2139/ssrn.538037>
- [3] Wu, J., Li, P., & Zhang, X. (2023). Prediction of NO_x emissions from coal-fired boilers under variable load conditions. *Fuel Processing Technology*, 247, Article 107984. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107984>
- [4] Deng, J., Liu, Z., & Zhang, W. (2021). A comprehensive review of NO_x and SO₂ reduction technologies in thermal power plants. *Journal of Cleaner Production*, 289, 125734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125734>
- [5] Asghar, M., & Zhang, T. (2021). Comparative analysis of modern emission control technologies in thermal power generation. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101850. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101850>
- [6] Liu, X., Wang, Q., & Zhao, Y. (2022). Carbon footprint of Chinese thermal power plants: Influence of fuel mix on CO₂ and NO_x emissions. *Applied Energy*, 308, 118291. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118291>
- [7] Arasto, A., & Sipilä, K. (2014). Reducing CO₂ emissions in power generation with CCS and biomass co-firing technologies. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 28, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.03.004>
- [8] Quang, T. H., & Nguyen, M. L. (2023). Pathways to zero and negative emissions in thermal energy using biomass and CCS technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 181, 113485. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113485>
- [9] Du, H., & Zhang, L. (2021). Technical and economic feasibility of zero and negative emission technologies in thermal energy. *Energy*, 233, 121004. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121004>
- [10] Bu, Y., & Zhang, X. (2025). Assessment of carbon emissions from thermal power plants using multimodal and satellite data. *Energy Informatics*, 8(2), 45–59. <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00352-1>
- [11] Li, J., & Zhang, Q. (2024). Estimation of power plant emissions using integrated satellite and ground-based data. *Remote Sensing of Environment*, 303, 113904. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.113904>
- [12] Liu, J., & Zhang, R. (2025). Intelligent boiler control systems for emission reduction in power plants. *Energy and AI*, 15, 100299. <https://doi.org/10.1016/j.egyai.2025.100299>
- [13] Gonzalez-Salazar, M. A., & Silva, C. (2018). Flexibility of gas-fired power plants and its environmental implications. *Energy Policy*, 123, 249–259. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.024>
- [14] Castelluccio, M., & Bianchi, F. (2025). Environmental performance of EMAS-registered power facilities in Italy: Impact of modernization. *Journal of Environmental Management*, 355, 117982. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.117982>
- [15] Nazari, S., & Mohammadi, A. (2010). Experimental determination of CO₂, SO₂, and NO_x emission factors from Iranian thermal power plants. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 32(15), 1430–1439. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.035>

© Шелешей Т. В., Усов І. І.

Дата надходження статті до редакції: 20.11.2025

Дата затвердження статті до друку: 08.12.2025

Опубліковано: 30.12.2025

Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0