

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА

Пояснювальна записка
до кваліфікаційної роботи
бакалавра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)
на тему

*Технології десульфуризації викидів в атмосферне повітря від
об'єктів теплоенергетики*

Виконав: студент 4 курсу, групи ТЗНС2022-1
спеціальності 183 Технології захисту
навколишнього середовища

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Халін В. П.

(прізвище та ініціали)

Керівник ст. викл. Ломакіна О. С.

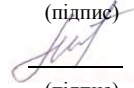
(прізвище та ініціали)

Рецензент д.т.н., проф. Савцова О.В.

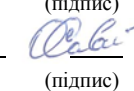
(прізвище та ініціали)



(підпис)



(підпис)



(підпис)

м. Харків – 2026 рік

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА ІМЕНІ О. М. БЕКЕТОВА

Інститут, факультет ІНІ будівництва, землеустрою та цивільної інженерії

Кафедра Інженерної екології міст

Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр

Галузь знань 18 Виробництво та технології

(шифр і назва)

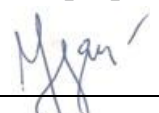
Спеціальність 183 Технології захисту навколишнього середовища

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.геол.н., проф. Удалов І. В.


"16" червня 2026 року

З А В Д А Н Н Я **на кваліфікаційну роботу бакалавра** **студента**

Халіна Володимира Петровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проєкту (роботи) Технології десульфуризації викидів в атмосферне повітря від об'єктів теплоенергетики

керівник проєкту (роботи) ст. викл. Ломакіна О. С.,

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджена наказом Університету від "22" травня 2026 року № 441-03

2. Строк подання студентом проєкту (роботи) 24.06.2026

3. Вихідні дані до проєкту (роботи): відкриті статистичні дані, результати наукових досліджень, навчальна література за тематикою роботи

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки: 1. Оцінка рівня забруднення атмосферного повітря в Україні діоксидом сірки 2. Методи скорочення викидів діоксиду сірки від теплових електростанцій 3. Вибір технології десульфуризації викидів від котлоагрегатів 4. Екологічний податок

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Презентація – 15 слайдів

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 24.05.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	<i>Збір вихідних даних</i>	25.05.26–27.05.26	
2	<i>Вивчення діоксиду сірки як забруднюючої речовини, визначення джерел її надходження в атмосферу. Аналіз забруднення атмосферного повітря України діоксидом сірки. Оцінка ризиків для здоров'я населення</i>	28.05.26–01.06.26	
3	<i>Вивчення методів скорочення викидів діоксиду сірки від теплових електростанцій</i>	02.06.26–06.06.26	
4	<i>Обґрунтування вибору технології десульфуризації викидів від котлоагрегатів</i>	07.06.26–11.06.26	
5	<i>Розрахунок суми екологічного податку</i>	12.06.26	
6	<i>Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи</i>	13.06.26-17.06.26	
7	<i>Підготовка презентації</i>	18.06.26-24.06.26	

Студент


(підпис)

Халін В. П.

(прізвище та ініціали)

Керівник проєкту (роботи)


(підпис)

Ломакіна О. С.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 61 с., 16 табл., 8 рис., 55 джерел.

АТМОСФЕРНЕ ПРОВІТРЯ, ДІОКСИД СІРКИ, ЗАХОДИ ЗІ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ, ДЕСУЛЬФУРИЗАЦІЯ, ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА

Об'єкт дослідження – сучасні методи десульфуризації викидів в атмосферне повітря від об'єктів теплоенергетики.

Мета роботи – аналіз сучасних методів десульфуризації викидів в атмосферне повітря від об'єктів теплоенергетики та оцінка їх ефективності.

Вивчено вплив діоксиду сірки, як забруднюючої речовини, на людину та компоненти довкілля.

Проаналізовано сучасний стан та динаміку забруднення атмосферного повітря в Україні діоксидом сірки, визначено основні галузі-забруднювачі.

Оцінено ризики для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки. Побудовано карту просторового розподілу рівня ризику.

Проаналізовано чинники, що впливають на формування викидів діоксиду сірки від об'єктів теплоенергетики.

Вивчено сучасні методи скорочення викидів діоксиду сірки від теплоенергетики, їх основні переваги та недоліки.

Обґрунтовано вибір технології десульфуризації димових газів на прикладі котла ТПП-210А з використанням методу аналізу ієрархій.

Розраховано суму екологічного податку за викиди діоксиду сірки в атмосферне повітря від котла ТПП-210А при використанні різних методів очистки викидів.

ЗМІСТ

ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ ДІОКСИДОМ СІРКИ	8
1.1 Характеристика діоксиду сірки як забруднюючої домішки.....	8
1.2 Джерела забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки.....	9
1.3 Аналіз забруднення атмосферного повітря України діоксидом сірки	11
1.4 Оцінка ризиків для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки	19
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ СІРКИ ВІД ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ	25
2.1 Формування викидів діоксиду сірки від теплоенергетики	25
2.2. Методи десульфуризації палива та викидів від котлоагрегатів.....	26
2.2.1 Методи знесірювання палива	26
2.2.2 Зв'язування сірки в процесі спалювання палива.....	28
2.2.3 Методи очистки димових газів від діоксиду сірки	29
РОЗДІЛ 3. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ДЕСУЛЬФУРИЗАЦІЇ ВИКИДІВ ВІД КОТЛОАГРЕГАТІВ.....	36
3.1 Розрахунок викидів діоксиду сірки від котла ТПП-210А.....	36
3.2 Вибір технології десульфуризації викидів	38
3.2.1 Методологія методу аналізу ієрархій (МАІ).....	38
3.2.2 Вибір оптимального способу десульфуризації газів від котла	41
РОЗДІЛ 4 ЕКОЛОГІЧНИЙ ПОДАТОК.....	47
ВИСНОВКИ.....	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

ВСТУП

Актуальність теми. Проблема забруднення атмосферного повітря є однією з найгостріших проблем сьогодення. Бурхливий розвиток промисловості в останньому сторіччі призвів до суттєвого погіршення якості атмосферного повітря і, відповідно, позначився на рівні здоров'я населення та погіршенні стану біотичних компонентів. Вирішення питання зниження забруднення атмосферного повітря, скорочення обсягів промислових викидів та забезпечення покращення якості атмосферного повітря залишається одним із найактуальніших викликів як у світі, так і в Україні.

Для великих міст України та промислово навантажених регіонів характерним є високий рівень забруднення атмосферного повітря. Більша частина населення України проживає в умовах невідповідності стану атмосферного повітря діючим нормативним вимогам до його якості, що призводить до підвищення рівня захворюваності населення. Найбільший антропогенний тиск на атмосферне повітря чинять добувна та переробна промисловість, теплоенергетика та автомобільний транспорт [1].

Теплова енергетика є одним з найбільш потужних забруднювачів атмосферного повітря. В Україні зосереджена найбільша кількість вугільних електростанцій у світі, які є лідерами за викидами діоксиду сірки та зольного пилу в Європі [2]. Викиди від теплових електростанцій містять у своєму складі золу, оксиди сірки та азоту, важкі метали, оксид та діоксид вуглецю.

З 2011 р. Україна є членом Енергетичного Співтовариства і, відповідно, має дотримуватись положень Договору про його заснування. Згідно цього Договору, всі великі спалювальні установки (установки, номінальна теплова потужність яких складає 50 МВт та більше) повинні відповідати вимогам Директиви 2001/80/ЄС Про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин у повітря від великих спалювальних установок. Для досягнення цієї мети в 2017 р. в Україні був прийнятий «Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок» [3], метою якого є забезпечення поступового

скорочення викидів діоксиду сірки, оксидів азоту та пилу до рівня, що відповідає вимогам Директиви 2010/75/ЄС, до кінця 2033 р. Тому впровадження технологічних рішень, які б дозволили скоротити викиди від об'єктів теплоенергетики, є актуальною проблемою українського сьогодення.

Мета кваліфікаційної роботи полягає в аналізі сучасних методів десульфуризації викидів в атмосферне повітря від об'єктів теплоенергетики та оцінка їх ефективності.

Для досягнення поставленої мети визначено такі *завдання*:

- 1) вивчити вплив діоксиду сірки, як забруднюючої речовини, на людину та компоненти довкілля;
- 2) визначити основні природні та антропогенні джерела викидів діоксиду сірки в атмосферне повітря;
- 3) проаналізувати сучасний стан та динаміку забруднення атмосферного повітря в Україні діоксидом сірки, визначити основні галузі-забруднювачі;
- 4) оцінити ризики для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки;
- 5) проаналізувати чинники, що впливають на формування викидів діоксиду сірки від об'єктів теплоенергетики;
- 6) вивчити сучасні методи скорочення викидів діоксиду сірки від теплоенергетики;
- 7) обґрунтувати вибір технології десульфуризації на конкретному прикладі з використанням методів експертної оцінки.

Об'єкт дослідження – сучасні методи десульфуризації викидів в атмосферне повітря від об'єктів теплоенергетики.

Предмет дослідження – ефективність сучасних методів десульфуризації викидів в атмосферне повітря від об'єктів теплоенергетики.

Практична значущість – на основі проведеного аналізу методів десульфуризації та їх оцінки визначено оптимальний технічний засіб скорочення викидів діоксиду сірки від котлоагрегату.

РОЗДІЛ 1. ОЦІНКА РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В УКРАЇНІ ДІОКСИДОМ СІРКИ

1.1 Характеристика діоксиду сірки як забруднюючої домішки

Діоксид сірки (SO_2 , двоокис сірки, сірчистий ангідрид, сірчистий газ) є забруднюючою речовиною, підвищений вміст якої в атмосферному повітрі чинить значний негативний вплив на здоров'я людини та окремі складові довкілля.

Діоксид сірки – це безбарвний газ, який має різкий запах. Він легко конденсується у рідину. SO_2 добре розчиняється у воді, утворюючи сульфїтну кислоту $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$. При взаємодії діоксиду сірки з водою утворюється сульфатна (сірчана) кислота $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ [4].

Діоксид сірки є основним джерелом утворення кислотних дощів, які негативно впливають як на біотичні компоненти, зокрема рослинність, так і на будівлі та споруди, викликаючи їх прискорену руйнацію, корозію металевих частин та передчасне зношування. При окисленні в атмосферному повітрі діоксид сірки перетворюється на сірчану кислоту та гідросульфати, підвищуючи кислотність дощів [5].

Густина парів сірчаної кислоти в 3–4 рази перевищує густину атмосферного повітря. Під дією сил тяжіння ці пари разом з атмосферними опадами випадають на ґрунт та у водні об'єкти. Це призводить до їх закиснення, що призводить до загибелі чутливих видів рослин та тварин. [6].

Діоксид сірки є отруйним та токсичним газом. Негативний вплив на організм людини проявляється цілою низкою порушень, а саме: порушенням вуглеводневого та білкового обміну, пригніченням окислювальних процесів у головному мозку, м'язах, печінці, зниженням вмісту вітамінів В та С, тощо. Діоксид сірки викликає подразнення кровотворних органів та негативні зміни в органах ендокринної системи й в кістковій тканині [7]. При вмісті двоокису сірки в атмосферному повітрі на рівні $20\text{--}30 \text{ мг/м}^3$ у людини спостерігається подразнення слизової оболонки рота та виникає неприємний присмак у роті [8].

Діоксид сірки чинить негативний вплив на стан рослин. Його негативний вплив на процес фотосинтезу є більшим, ніж у інших забруднюючих домішок [9]. Під дією діоксиду сірки у рослин спостерігається пошкодження поверхні листя або хвої в результаті руйнування хлорофілу, що бере участь у процесі фотосинтезу. Хвойна рослинність є більш чутливою до впливу SO_2 , ніж листяна. Порушення процесів фотосинтезу й подальша загибель рослин спостерігається при концентрації діоксиду сірки в атмосферному повітрі в межах $0,23\text{--}0,32 \text{ мг/м}^3$ [10].

Діоксид сірки відноситься до забруднюючих речовин 3 класу небезпеки. Для нього встановлено наступні значення ГДК в атмосферному повітрі населених місць: $\text{ГДК}_{\text{мр}} = 0,5 \text{ мг/м}^3$, $\text{ГДК}_{\text{сд}} = 0,05 \text{ мг/м}^3$ [11].

Вміст діоксиду сірки обов'язково контролюється в атмосферному повітрі населених пунктів. Згідно «Порядку здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря» [12] він відноситься до списку А – переліку забруднюючих речовин, спостереження за вмістом яких в атмосферному повітрі здійснюють Міністерство охорони здоров'я, ДСНС на мережі спостережень національної гідрометеорологічної служби, обласні, Київська та Севастопільська міські адміністрації а також виконавчі органи міських рад.

1.2 Джерела забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки

Діоксид сірки надходить в атмосферне повітря як від природних, так і від антропогенних джерел.

В природі сірка є необхідним біогенним елементом для синтезу окремих амінокислот. Головним чином сірка накопичена в літосфері у вигляді вільної сірки, колчеданів, тощо. Для живих організмів вона доступна тільки у вигляді сульфату SO_4 . Діоксид сірки в природному колообігу сірки утворюється як проміжний продукт і присутній у більшості біотопів у малих кількостях [13]. Також природними джерелами надходження діоксиду сірки в атмосферне повітря є вулканічні гази, що виділяються в атмосферу при виверженнях

вулканів, процеси окислення сірки та сульфати, розсіяні в морі.

Антропогенна діяльність людини призводить до різкого збільшення вмісту діоксиду сірки в атмосфері і є основним джерелом його надходження.

У загальних викидах сірчистих сполук, що викидаються в атмосферне повітря, на долю сірчистого ангідриду приходиться близько 95% [8]. Основними джерелами емісії є промислові підприємства різних галузей, зокрема хімічної (виробництво сульфатної кислоти та сульфату амонію), металургійної, керамічної, харчової, паперової промисловості, об'єктів теплоенергетики, виробництва будівельних матеріалів (виробництво лінолеуму, толю, мінераловатних плит, пінопласту), тощо [14]. Близько 80% від загальної кількості викидів діоксиду сірки приходиться на долю енергетичної, металургійної (чорна металургія) та вугільної промисловості [15].

Розглянемо більш детально викиди від тих галузей промисловості, що є найбільш потужними забруднювачами атмосферного повітря сірчистим ангідридом:

1. Видобуток мінеральної сировини та металургія [16, 17]

При виробництві 1 млн т металургійної продукції за добу в середньому утворюється 200 т діоксиду сірки.

При виробництві агломерату біля 90% сірки, що міститься у сировині, переходить у викиди у вигляді SO_2 , зокрема, при використанні 1 т малосірчаної руди виділяється 3–5 кг SO_2 та при використанні 1 т сірчаної руди – 10–15 кг. Викид діоксиду сірки від однієї агломераційної машини складає близько 700 т/добу.

При коксохімічному виробництві інтенсивним виділенням діоксиду сірки супроводжуються наступні процеси: заповнення простору печі шихтою (питоме виділення 32 г/т коксу); видача коксу з камер коксування в гасильний вагон (питоме виділення 22 г/т коксу).

При доменній виплавці чавуну питоме утворення оксидів сірки складає 0,2–0,3 кг/т чавуну, при виплавці сталі 0,4–3,5 кг/т. При виплавці 1 т сталі утворюється 30 кг діоксиду сірки.

Валовий викид SO_2 від мартенівського цеху складає 280 т/рік. Внесок мартенівських печей у загальну кількість викидів оксидів сірки складає близько 90%. В залежності від виду використаного палива, кількість діоксиду сірки у викидах різняться. При опаленні коксодоменним газом її вміст може досягати 800 мг/м^3 . В мартенівських печах, які опалюються природним газом, найбільший викид SO_2 відбувається при зливанні рідкого чавуну з печі. Конверторний газ може містити $105\text{--}205 \text{ мг/м}^3 \text{ SO}_2$ в залежності від вмісту сірки у вапняку.

2. Паливно-енергетичний комплекс [17]

У загальній кількості сірчистих сполук, що викидаються від теплоенергетики, на долю SO_2 приходить 98–99%. Утворення SO_2 при спалюванні в котлоагрегатах вугілля або мазуту викликане вмістом сірки у паливі (сірчистістю). Найбільшу сірчистість має вугілля. У викидах від спалювання природного газу SO_2 не міститься. Так від ТЕС потужністю 1000 МВт викидається наступна кількість двоокису сірки: газове паливо – 0,012 тис.т, мазут – 52,33 тис.т, вугілля – 139 тис.т.

3. Вугільна промисловість [18]

Щорічний викид діоксиду сірки підприємствами вугільної галузі сягає 29 тис. т. Одним з основних джерел забруднення атмосферного повітря є породні відвали. Частка SO_2 у викидах від згоряння палива та горіння породних відвалів складає 9% від загальної кількості викидів від них.

1.3 Аналіз забруднення атмосферного повітря України діоксидом сірки

За даними дослідження [19] період з квітня 2018 р. по травень 2020 р. характеризувався відносно невеликим забрудненням атмосферного повітря діоксидом сірки. Найбільші значення концентрації діоксиду сірки спостерігались на сході України (Донецька, Дніпропетровська, Запорізька області, м. Київ), що могло бути обумовлено діяльністю промисловості та вугільних шахт. Також автори відмічають сезонність зміни концентрації з

максимумом у листопаді-січні, яку автори пов'язують із відсутністю рослинності та скороченням кількості опадів та підвищеними викидами внаслідок опалення житлових будинків.

У дослідженні [20] за період з липня 2018 р. по червень 2019 р. автори відмічають неоднорідність просторового розподілу концентрації діоксиду сірки. Підвищенні концентрації також спостерігались у Донецькій, Запорізькій та Дніпропетровській областях, а також у районах морських портів Чорного та Азовського морів. Найвища концентрація спостерігалась в районі Старобешевської ТЕС.

У дослідженні [21] відмічається, що у період 2019-2020 р.р для діоксиду сірки спостерігається найменша повторюваність небезпечних концентрацій діоксиду сірки. Мали місце окремі випадки перевищення ГДК_{мр} у м. Обухів, Сєверодонецьк та Київ, в інших містах середній вміст діоксиду сірки не перевищував ГДК. Автори відзначають, що для частки міст вміст діоксиду сірки в атмосферному повітрі є максимальним у холодний період і пов'язують це із збільшенням викидів від спалювання твердого палива при опалюванні.

Аналіз динаміки загальних обсягів викидів діоксиду сірки виконувався за період 2000–2021 р.р. відповідно до державних статистичних даних щодо викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря [21, 22].

Динаміка річних викидів діоксиду сірки від стаціонарних та пересувних джерел забруднення за період 2000–2021 р.р. на території України наведена на рис. 1.1.

Внесок стаціонарних джерел у загальний обсяг викидів діоксиду сірки складав 97–99%.

Найвищі обсяги викидів спостерігались протягом 2011–2013 р.р.

Починаючи з 2017 р. спостерігається стійка тенденція до скорочення загальної кількості викидів.

Динаміка питомих викидів за період 2000–2021 рр. наведена на рис. 1.2.

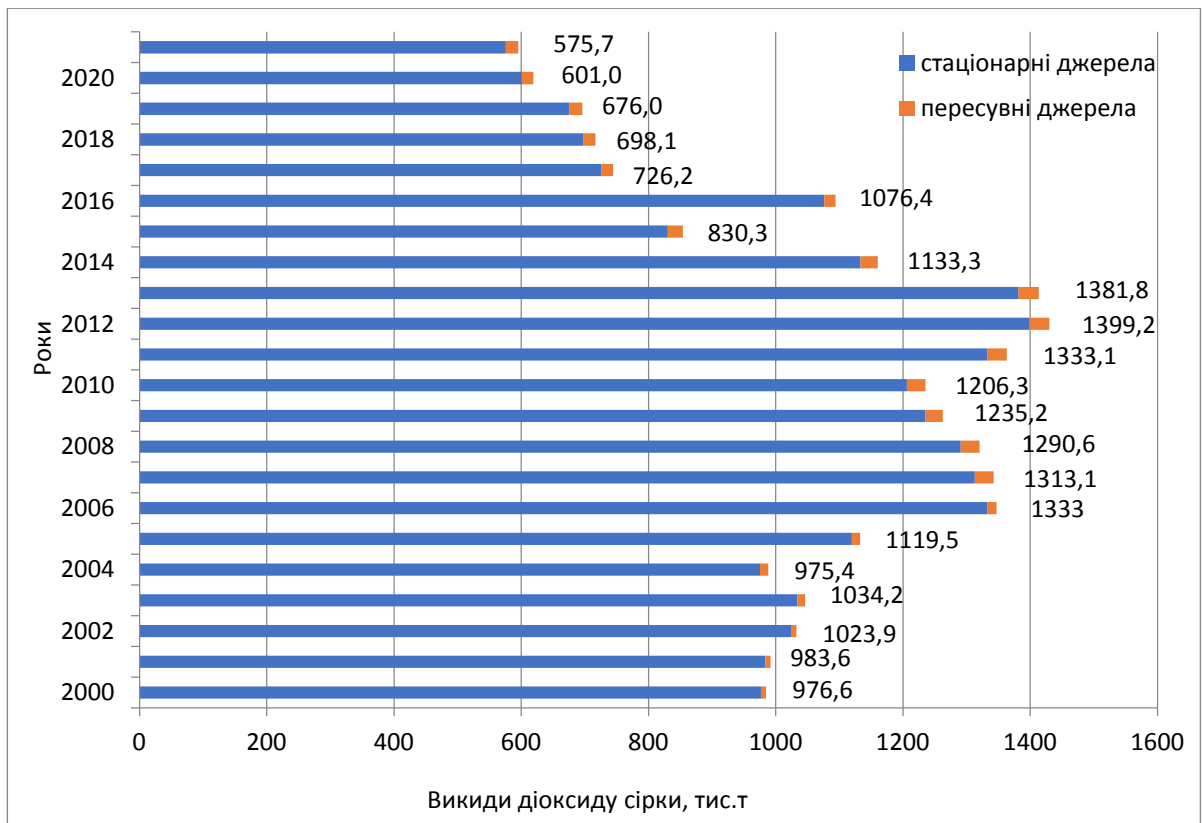


Рисунок 1.1 – Динаміка викидів діоксиду сірки в Україні (побудовано на основі [22])

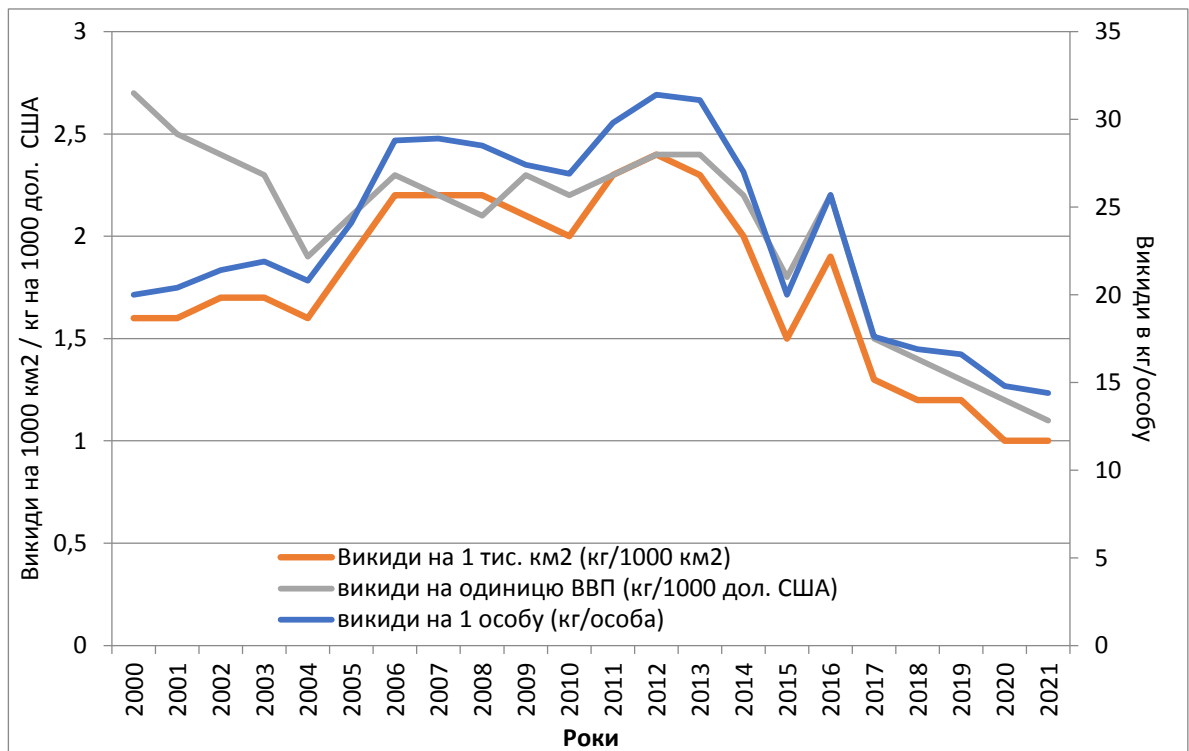


Рисунок 1.2 – Динаміка питомих показників викидів діоксиду сірки в Україні (побудовано на основі [22])

Кількість викидів SO₂ на одного мешканця України протягом аналізованого періоду коливалась у межах 14,4–31,4 кг/особу.

Кількість викидів SO₂ на одиницю площі території України знаходилась у межах 1–2,4 кг/тис.м².

Кількість викидів SO₂ на одиницю ВВП України знаходилась у межах від 1,1–2,5 кг/ тис. дол. США. Найбільші значення питомих викидів приходились також на період 2011–2013 р.р.

Починаючи з 2017 р. спостерігається стійка тенденція до скорочення кількості питомих викидів.

Загальний обсяг викидів діоксиду сірки від стаціонарних джерел за період 2020–2024 р.р. скоротився на 42,7% з 601 тис. т. у 2020 р. до 256,9 тис. т. у 2024 р. Найбільші обсяги викидів у 2024 р. відбувалися з території Івано-Франківської та Дніпропетровської областей. Їх сумарний внесок у загальний обсяг викидів с території України складає 60,2 % [23].

У розрізі галузей промисловості найбільша кількість викидів діоксиду сірки у 2024 р. приходить на долю процесів спалювання в енергетичній галузі промисловості, переробній промисловості та будівництві, в малих установках. Їх сумарний внесок у загальну кількість викидів в Україні складає 96,6% , при цьому на долю процесів спалювання в енергетичних галузях промисловості приходить 88,8% [24]. Більш детальна інформація по викидах діоксиду сірки від стаціонарних джерел забруднення за видами економічної діяльності та їх динаміка наведені у табл. 1.1. та на рис. 1.3.

Таблиця 1.1 – Викиди SO₂ в атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення за видами економічної діяльності у 2024 р. [24]

Види економічної діяльності	Обсяг викидів, т/рік	Обсяг викидів, % від загальної кількості
Всього по Україні	256885,346	
Процеси спалювання в енергетичних галузях промисловості	228114,380	88,80

Види економічної діяльності	Обсяг викидів, т/рік	Обсяг викидів, % від загальної кількості
Процеси спалювання в переробній промисловості та будівництві	17507,029	6,82
Процеси спалювання в малих установках	2523,063	0,98
Целюлозно-паперова промисловість	1551,793	0,60
Виробництво чавуну і сталі	1398,839	0,54
Виробництво цементу	1253,418	0,49
Інші види	4536,824	1,77

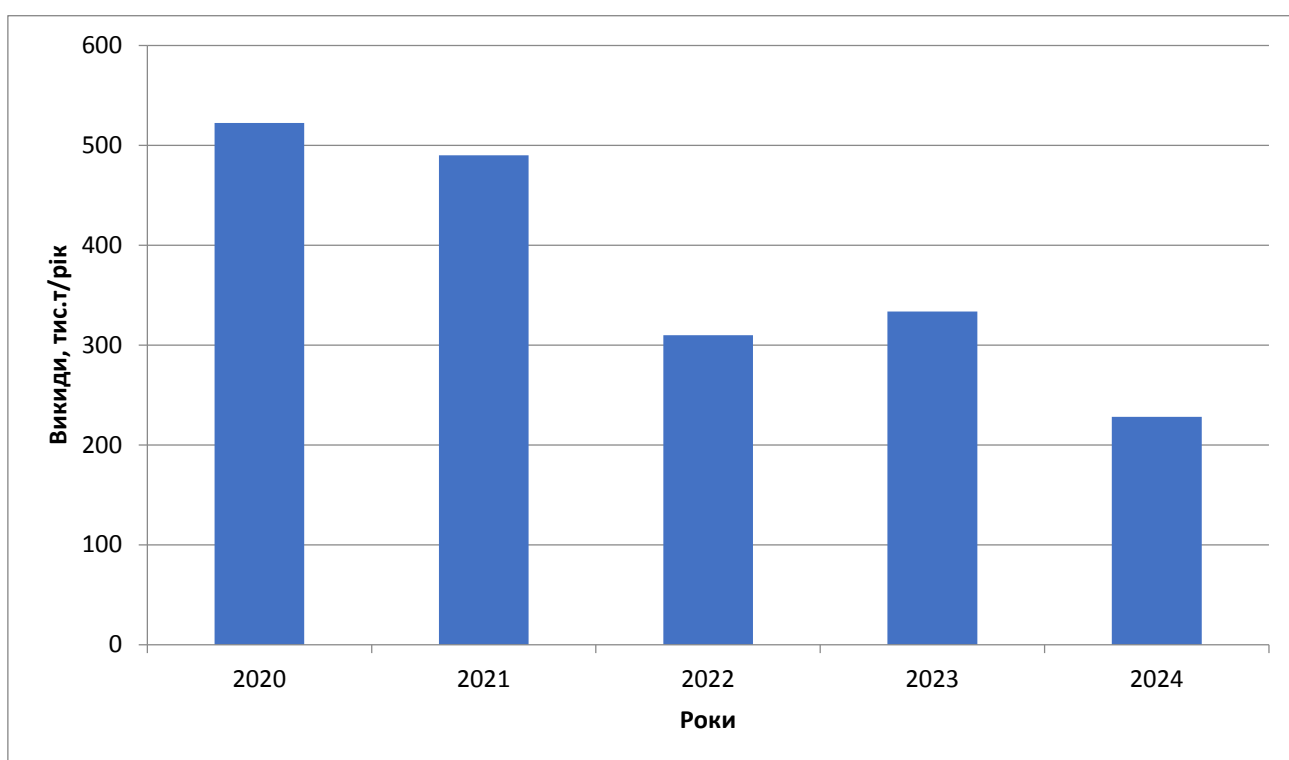


Рисунок 1.3 – Динаміка викидів діоксиду сірки від процесів спалювання в енергетичних галузях промисловості (побудовано за [24])

Спостереження за вмістом діоксиду сірки в населених пунктах України здійснюється гідрометеорологічними організаціями, що входять до складу Державної служби України з надзвичайних ситуацій на стаціонарних постах спостережень (у 2024 р. – на 120 постах у 35 містах).

За період 2020 р.– перше півріччя 2024 р. за даними [25] середньорічна концентрація діоксиду сірки в атмосферному повітрі міст України знаходилась

в межах 0,17–0,19 мг/м³ (0,34–0,38 долей ГДКсд). Частка міст, де середньорічний вміст перевищує 1 ГДКсд є невисокою – 3%. Більш детальна інформація наведена у табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вміст діоксиду сірки в атмосферному повітрі міст України за даними спостережень гідрометеорологічних організацій [25]

Рік	Середньорічний вміст		Максимальний вміст, мг/м ³	Частка міст (%), де середньорічний вміст перевищував 1 ГДКсд
	в мг/м ³	в долях ГДКсд		
2020	0,019	0,38	0,409	3
2021	0,017	0,34	0,289	0
2022	0,018	0,36	0,285	3
2023	0,018	0,36	0,464	2,9
I півріччя 2024	0,018	0,36	0,358	3

На основі щомісячних даних щодо вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі окремих міст України [25] розраховано середню концентрацію SO₂ по 33 містах України за період грудень 2023–листопад 2024 рр. (табл. 1.3).

Встановлено, що перевищення середньої за зазначений період концентрації над ГДКсд спостерігається у м. Київ (в 1,46 рази) та м. Суми (в 1,003 рази). Слід зазначити, що у Києві спостерігається постійне перевищення середньомісячних концентрацій над ГДКсд, в Сумах перевищення ГДКсд спостерігається починаючи з травня. Також мають місце поодинокі випадки перевищення ГДКсд для міст Чернігів (березень 2024 р.) та Українка (липень 2024 р.).

Таблиця 1.3 – Середня концентрація діоксиду сірки по містах України за період грудень 2023 – листопад 2024 рр.
(складено за [25])

Місто	Середньомісячна концентрація, мг/м ³												Середня за період	
	грудень 2023	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	мг/м ³	в долях ГДКсд
Біла Церква	0,031	0,032	0,032	0,032	0,039	0,038	0,04	0,04	0,039	0,039	0,039	0,035	0,036	0,727
Бровари	0,037	0,037	0,037	0,036	0,039	0,04	0,044	0,044	0,043	0,05	0,038	0,039	0,040	0,807
Вінниця	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0	0	0	0	0,001	0,013
Горішні Плавні	0,006	0,006		0,006	0,007	0,005	0,006	0,004	0,007	0,005	0,004	0,006	0,006	0,113
Дніпро	0,01	0,011	0,013	0,013	0,011	0,01	0,012	0,01	0,013	0,014	0,012	0,013	0,012	0,237
Житомир	0,038	0,038	0,037	0,04	0,038	0,039	0,04	0,04	0,039	0,037	0,038	0,037	0,038	0,768
Запоріжжя	0,006	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,006	0,007	0,138
Івано-Франківськ	0,007	0,006	0,007	0,007	0,006	0,004	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,103
Ізмаїл	0,023	0,023	0,021	0,022	0,022	0,023	0,024	0,024	0,023	0,025	0,024	0,026	0,023	0,467
Кам'янське	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,009	0,01	0,008	0,008	0,007	0,006	0,007	0,137
Київ	0,092	0,092	0,087	0,091	0,07	0,062	0,06	0,061	0,058	0,059	0,064	0,08	0,073	1,460
Кременчук	0,007	0,009	0,008	0,008	0,008	0,007	0,008		0,009	0,009	0,008	0,007	0,008	0,160
Кривий Ріг	0,017	0,023	0,022	0,021	0,027	0,026	0,035	0,028	0,032	0,031	0,026	0,024	0,026	0,520
Кропивницький	0,018	0,019	0,018	0,018	0,018	0,018	0,017	0,017	0,019	0,021	0,02	0,02	0,019	0,372
Луцьк	0,002	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,045
Львів	0,005	0,006	0,005	0,005	0,005	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,090
Миколаїв	0,006	0,005	0,006	0,004	0,002	0,005	0,006	0,005	0,005	0,003	0,007	0,006	0,005	0,100
Обухів	0,026	0,026	0,03	0,03	0,037	0,038	0,039	0,043	0,044	0,045	0,045	0,04	0,037	0,738
Одеса	0,038	0,038	0,04	0,041	0,041	0,038	0,047	0,042	0,042	0,041	0,038	0,037	0,040	0,805

Продовження таблиці 1.3

Місто	Середньомісячна концентрація, мг/м ³												Середня за період	
	грудень 2023	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	мг/м ³	в долях ГДКсд
Олександрія	0,019	0,019	0,019	0,018	0,019	0,017	0,019	0,019	0,02	0,022	0,021	0,02	0,019	0,387
Полтава	0,003	0,004	0,004	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,002	0,045
Рівне	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,023
Світловодськ	0,013	0,011	0,017	0,016	0,021	0,019	0,021	0,029	0,037	0,044	0,021	0,014	0,022	0,438
Суми	0,034	0,034	0,036	0,036	0,039	0,056	0,056	0,063	0,063	0,067	0,059	0,059	0,050	1,003
Тернопіль	0,004	0,004	0,003	0,004	0,003	0,004	0,004	0,004	0,006	0,004	0,004	0,005	0,004	0,082
Ужгород	0,016	0,016	0,015	0,014	0,015	0,015	0,015	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,015	0,293
Українка	0,047	0,046	0,048	0,048	0,036	0,042	0,049	0,052	0,049	0,048	0,046	0,042	0,046	0,922
Харків	0,015	0,017	0,014	0,014	0,012	0,011	0,012	0,013	0,017	0,033	0,022	0,017	0,016	0,328
Херсон	0,005	0,002	0,003	0,005	0,002	0,001	0,001	0,003	0,004	0,002	0,002	0,005	0,003	0,058
Хмельницький	0,013	0,009	0,014	0,016	0,016	0,016	0,017	0,016	0,018	0,021	0,019	0,018	0,016	0,322
Черкаси	0,011	0,012	0,011	0,014	0,012	0,011	0,011	0,016	0,016	0,017	0,021	0,021	0,014	0,288
Чернівці	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	0,002	0,038
Чернігів	0,044	0,045	0,043	0,051	0,032	0,034	0,038	0,041	0,046	0,046	0,038	0,039	0,041	0,828

Примітка. сірим кольором виділено значення концентрацій, що перевищують ГДКсд = 0,05 мг/м³

1.4 Оцінка ризиків для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки

Екологічний ризик є одним з основних понять екологічної безпеки, що тісно пов'язаний із забрудненням довкілля як від природніх, так і від антропогенних джерел забруднення. Це забруднення чинить загрозу біосфері та здоров'ю і життю людини. З екологічним ризиком пов'язані такі види ризиків, як ризики, що загрожують безпеці, здоров'ю, стану довкілля та суспільному добробуту [26, 27].

Із загального переліку екологічних ризиків, можна виділити наступні важливі види ризиків, що пов'язані безпосередньо із забрудненням атмосферного повітря:

- забруднення повітря екотоксикантами (стійкими органічними забруднювачами, важкими металами та іншими токсичними речовинами), продуктами згоряння палива від виробництва теплової та електричної енергії, викидами від військово-промислового комплексу;

- забруднення повітря в приміщеннях токсичними речовинами, в тому числі родоном, джерелом якого є будівельні матеріали [26].

Порядок оцінки ризику для здоров'я населення, пов'язаного із забрудненням атмосферного повітря визначається Методичними рекомендаціями «Оцінка канцерогенного та неканцерогенного ризику для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря», затвердженими наказом МОЗ № 1811 від 18.10.23 р. (далі – Методичні рекомендації).

Зазначені Методичні рекомендації використовуються для проведення оцінки рівня ризиків для здоров'я населення від хімічного забруднення атмосферного повітря, що сформувалось під впливом промислових джерел та життєдіяльності населення на територіях окремих населених пунктів та процесів подальшої трансформації забруднюючих речовин, що надходять в атмосферне повітря [28].

Діоксид сірки не є канцерогенною речовиною, тому, згідно Методичних рекомендацій, для нього виконується оцінка ризику розвитку неканцерогенних ефектів за допомогою розрахунку коефіцієнту небезпеки, який дозволяє порівняти фактичний рівень впливу діоксиду сірки з безпечним рівнем (референтним).

Коефіцієнт небезпеки HQ розраховується за наступною формулою:

$$HQ = \frac{C}{RfC}, \quad (1.1)$$

де C – рівень впливу речовини, мг/м^3 ;

RfC – безпечний рівень впливу (референтна концентрація), мг/м^3 .

В якості рівня впливу прийняті осереднені за період грудень 2023 – листопад 2024 р.р. концентрації діоксиду сірки по містах України, визначені у розділі 1.3 та наведені у табл. 1.3. Результати розрахунку коефіцієнту небезпеки HQ наведені у табл. 1.4.

Згідно додатку 1 Методичних рекомендацій референтна концентрація для SO_2 дорівнює $0,05 \text{ мг/м}^3$.

Згідно Методичних рекомендацій, якщо значення HQ є меншим за одиницю, то вірогідність виникнення у людини шкідливих ефектів є незначною і вплив забруднюючої речовини вважається допустимим. Якщо значення $HQ > 1$, то вірогідність виникнення шкідливих ефектів зростає і є пропорційною зростанню коефіцієнта небезпеки.

Рівень неканцерогенного ризику визначається відповідно до класифікації рівнів, наведеної у Додатку 3:

- високий рівень ($HQ > 3$);
- насторожуючий ($1,1 < HQ < 3$);
- допустимий ($0,11 < HQ < 1,0$);
- мінімальний (цільовий) ($HQ < 0,1$).

Таблиця 1.4 – Рівні ризику для окремих міст України (грудень 2023 – листопад 2024 р.р.)

Населений пункт	Рівень впливу речовини С, мг/м ³	Коефіцієнт небезпеки HQ	Рівень ризику
Біла Церква	0,036	0,72	допустимий
Бровари	0,040	0,8	допустимий
Вінниця	0,001	0,02	цільовий
Горішні Плавні	0,006	0,12	допустимий
Дніпро	0,012	0,24	допустимий
Житомир	0,038	0,76	допустимий
Запоріжжя	0,007	0,14	допустимий
Івано-Франківськ	0,005	0,1	цільовий
Ізмаїл	0,023	0,46	допустимий
Кам'янське	0,007	0,14	допустимий
Київ	0,073	1,46	насторожуючий
Кременчук	0,008	0,16	допустимий
Кривий Ріг	0,026	0,52	допустимий
Кропивницький	0,019	0,38	допустимий
Луцьк	0,002	0,04	цільовий
Львів	0,005	0,1	цільовий
Миколаїв	0,005	0,1	цільовий
Обухів	0,037	0,74	допустимий
Одеса	0,040	0,8	допустимий
Олександрія	0,019	0,38	допустимий
Полтава	0,002	0,04	цільовий
Рівне	0,001	0,02	цільовий
Світловодськ	0,022	0,44	допустимий
Суми	0,050	1	допустимий
Тернопіль	0,004	0,08	цільовий
Ужгород	0,015	0,3	допустимий
Українка	0,046	0,92	допустимий
Харків	0,016	0,32	допустимий
Херсон	0,003	0,06	цільовий
Хмельницький	0,016	0,32	допустимий
Черкаси	0,014	0,28	допустимий
Чернівці	0,002	0,04	цільовий
Чернігів	0,041	0,82	допустимий

Для побудови карти просторового розподілу рівня неканцерогенного ризику від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки попередньо було складено таблицю з вихідними даними, яка містить:

- назви населених пунктів, в яких проводяться спостереження за забрудненням атмосферного повітря і для яких розраховано значення коефіцієнту небезпеки;
- координати населених пунктів в десяткових градусах;
- значення розрахованого коефіцієнту небезпеки.

Побудова карт просторового розподілу рівня неканцерогенного ризику виконувалась за допомогою програми QGIS, яка є безкоштовною ГІС-програмою, що дозволяє вирішувати різноманітні завдання, необхідні для просторового аналізу даних та побудови тематичних екологічних карт.

Контури України завантажено з ресурсу <https://data.humdata.org> [28].

На підготовчому етапі файл з таблицею вихідних даних був збережений у форматі CSV. На його основі у програмі QGIS створено точковий шар у прямокутній системі координат WGS 84 / UTM zone 35N. На основі цього шару за допомогою інструмента «Інтерполяція» (методом зворотно зважених відстаней, IDW Interpolation) побудовано растровий шар просторового розподілу коефіцієнту небезпеки.

Процес інтерполяції в ГІС полягає в тому, що за допомогою значень показника в певних точках вимірювань, заповнюються проміжки між цими точками, тобто моделюється безперервний розподіл заданого показника – створюється безперервна поверхня. При цьому дотримуються припущення, що всі об'єкти, розташовані поруч, мають схожі характеристики. Інтерполяція виконується для растру – області прямокутної форми. [29].

Для виконання просторової інтерполяції даних обрано метод зворотно зважених відстаней. Метод зворотно зважених відстаней ґрунтується на припущенні, що значення показника у точці, в якій не проводилось вимірювання, є середньо-ваговим за відстанню із значень у точках вимірювань, що розташовані по сусідству в межах певного радіусу навколо цієї точки. Цей

метод передбачає, що чим більшою є відстань від точки вимірювання показника, тим меншим є її вплив і навпаки [29].

Кольоровий ряд для отриманого шляхом інтерполяції растрового шару розподілу коефіцієнта небезпеки налаштовано відповідно рівням неканцерогенного ризику

- насторожуючий ($1,1 < HQ < 3$) – червоний колір;
- допустимий ($0,11 < HQ < 1,0$) – жовтий колір;
- мінімальний (цільовий) ($HQ < 0,1$) – зелений колір.

Побудована карта просторового розподілу рівня неканцерогенного ризику наведена на рис. 1.4.

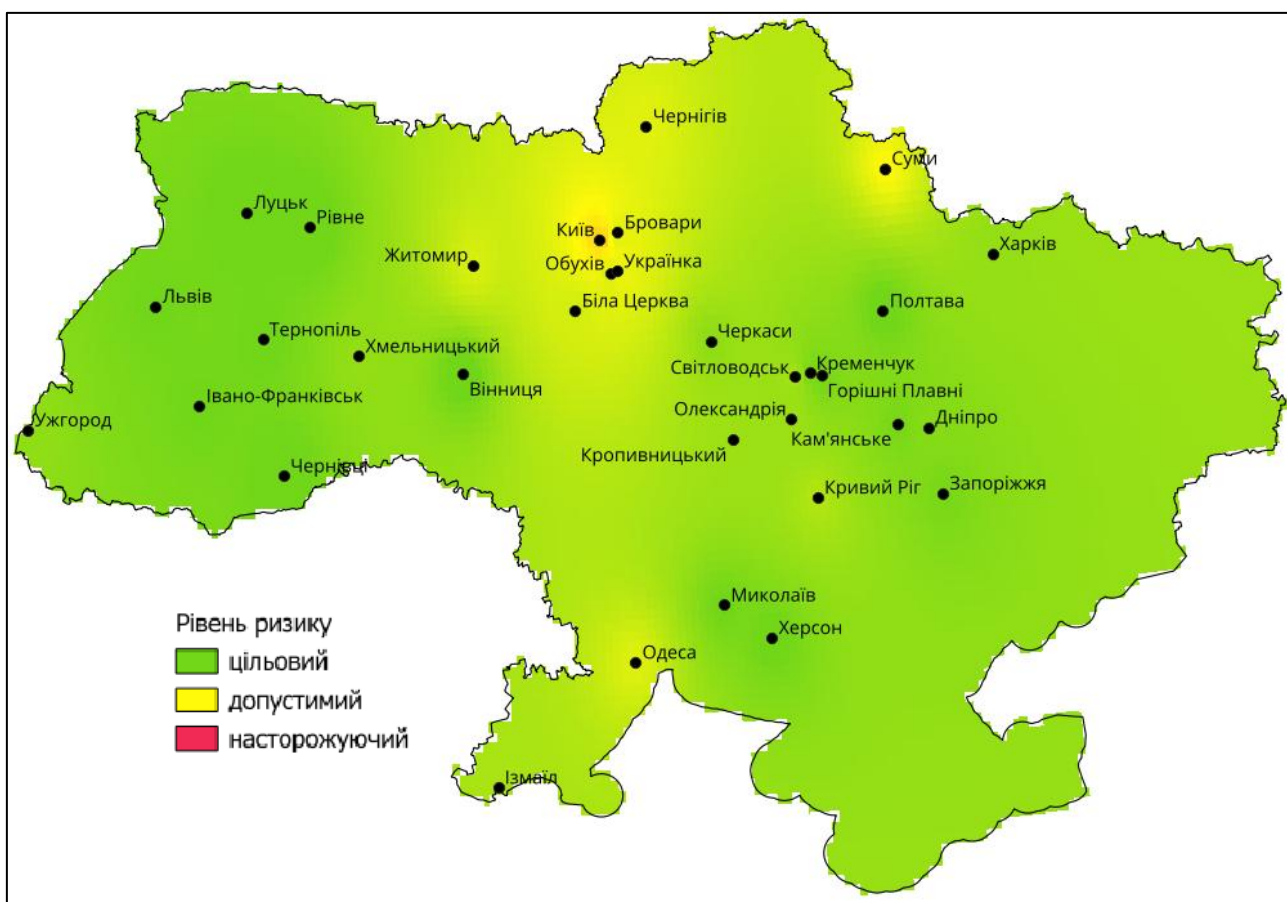


Рисунок 1.4 – Карта просторового розподілу рівня неканцерогенного ризику від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки за період грудень 2023 – листопад 2024 р.р. (картографічна основа [28])

Аналізуючи отримані значення коефіцієнту небезпеки можна зробити наступний висновок:

- насторожуючий рівень ризику встановлений для м. Київ;
- цільовий (мінімальний) рівень ризику встановлений для 10 населених пунктів (Вінниця, Івано-Франківськ, Луцьк, Львів, Миколаїв, Полтава, Рівне, Тернопіль, Херсон, Чернівці);
- для інших населених пунктів рівень ризику є допустимим.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ СКОРОЧЕННЯ ВИКИДІВ ДІОКСИДУ СІРКИ ВІД ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

2.1 Формування викидів діоксиду сірки від теплоенергетики

Наявність діоксиду сірки у викидах від об'єктів теплоенергетики обумовлена процесами спалювання органічного палива у котлоагрегатах. Основними видами палива, що використовуються в теплоенергетиці, є вугілля, мазут та природний газ.

Сірка завжди міститься у складі вугілля та мазуту, що використовується на ТЕС. Сірка у вугіллі представлена мінеральними та органічними сполуками. Мінеральні сполуки – це пірит (залізний колчедан), сульфати заліза та кальцію, марказит. Головним чином – це колчеданна сірка, що входить до складу піриту. Сульфатна сірка міститься у незначній кількості (0,1–0,2%) [16]. Елементна сірка іноді міститься у складі вугілля [30].

Діоксид сірки утворюється як результат окиснення органічної та піритної сірки, що міститься у вугіллі [30]. При окиснювальному спалюванні сірка окиснюється до діоксиду сірки за наступною хімічною реакцією: $S + O_2 \rightarrow SO_2$ [6]. Кількість утвореного діоксиду сірки залежить від сірчистості вугілля, яка коливається в межах від 2,4–5,9 % [31]. В українському вугіллі сірка міститься у значній кількості (сірчистість 1,7–3,6%) [32].

Сірка в мазуті представлена як складова органічних сполук. В залежності від сірчистості, мазуту розділяють на високосірчисті (сірчистість 2,5–3%) та малосірчисті (сірчистість 0,4%) [31]. Мазут, що використовується на українських ТЕС містить значну кількість сірки, що призводить до високих концентрацій діоксиду сірки у викидах – до 3,5 г/м³ [30].

Найбільші обсяги викидів діоксиду сірки утворюються при спалюванні високосірчистого вугілля та сірчистого мазуту. У викидах від спалювання природного газу сполуки сірки зазвичай не містяться, або їх кількість є незначною.

На обсяги утворення діоксиду сірки при процесах спалювання впливає

вид палива, його хімічний склад та технологія спалювання (рідке або тверде шлаковидалення при спалюванні вугілля, факельне спалювання мазуту). Якщо до мінерального складу вугілля входять сполуки лужних та лужноземельних металів, то сірка частково зв'язується золою. При цьому утворюються сульфати або сульфіти [31].

2.2. Методи десульфуризації палива та викидів від котлоагрегатів

Скорочення обсягів викиду діоксиду сірки від котлоагрегатів можна досягти наступними шляхами:

- вилучення сірки з палива до процесу спалювання;
- зв'язування сірки в процесі спалювання;
- очистка димових газів від вже утвореного діоксиду сірки (сіркоочищення).

Розглянемо більш детально вищезазначені підходи до десульфуризації.

2.2.1 Методи знесірювання палива

Метою десульфуризації палива є скорочення вмісту сірки у вихідному паливі, що подається до котлоагрегатів. Зниження сірчистості палива дозволяє скоротити кількість утворюваного в результаті спалювання діоксиду сірки. Виділяють наступні методи десульфуризації вугілля:

- фізичні (збагачення). Під час збагачення вугілля з нього вилучається неорганічна сірка, головним чином пірит. Вугілля подрібнюється та пірит видаляється за допомогою способів, заснованих на різниці густин вугілля і пириту, або на різниці їх поверхневих властивостей. Скорочення вмісту сірки у вугіллі може здійснюватись шляхом електростатичної десульфуризації, сухої сепарації та флотації. На ефективність процесу впливає обрана технологія, тип вугілля, характер та крупність включень піриту, його фізичні властивості [6, 33]. При простому збагаченні вугілля з нього видаляється тільки колчеданна сірка за рахунок того, що вона має більшу густину, ніж вугілля. Якщо значна частка загальної сірки у вугіллі – це саме колчеданна сірка і

вкраплення колчедану є достатньо великими, то його видалення дозволяє значно знизити подальший викид діоксиду сірки [34];

– хімічні методи поділяються на дві групи: обробка хімічними реагентами для розчинення сірки при підвищених температурі та тиску й вибіркове окислення або відновлення сполук сірки, головним чином, піриту [33]. Наприклад, гідротермічне безсірковання вугілля дозволяє видалити з нього колчеданну та органічну сірку. Подрібнене паливо обробляється в автоклавах лужними розчинами (містять гідрати натрію та калію). Тиск в автоклавах складає 1,75 МПа, температура приблизно складає 300⁰С. Гідротермічне безсірковання вугілля дозволяє значно скоротити вміст сірки в ньому [34];

– за допомогою мікроорганізмів. Десульфуризація вугілля за допомогою мікроорганізмів відбувається за допомогою бактерій (*Acidithiobacillus ferrooxidans*, тощо), які розкладають органічну сірку. Неорганічна сірка, головним чином піритна, біоокислюється за рахунок ферментативних реакцій з виділенням сульфату та заліза. Органічна сірка розщеплюється метаболічним шляхом, спрямованим на гетероциклічні сполуки [35]. Бактеріологічні методи дозволяють забезпечити високій ступінь вилучення піритної сірки і вилучити до 50% органічної сірки. Недоліком процесу є його значна тривалість [33].

Таким чином, шляхом видалення піритної сірки з вугілля здійснюється головним чином фізичними методами, органічної – хімічними або мікробіологічними.

Для зменшення вмісту сірки в мазуті, виконують видалення сірки з нафти на нафтопереробних заводах. Видалення здійснюється шляхом гідрогенізації в присутності кобальт-молібденового каталізатора. При цьому необхідними є температура 250–500⁰С та тиск 1,4–10 МПа. Сутність процесу полягає у розкладанні сірковмісних органічних сполук з утворенням сірководню, який далі відновлюється до елементної сірки [6].

Очистка палива від сірчистих сполук можлива шляхом його газифікації, при якій одночасно з основним процесом видаляється сірка та її сполуки. Газифікація палива полягає в тому, що при високих температурах паливо

переводиться у газоподібний стан за рахунок неповного окиснення. Результатом процесу газифікації є генераторний газ. Утворені при цьому забруднюючі домішки, наприклад, елементарна сірка, є побічними продуктами, які мають товарне значення. В процесі газифікації з палива виділяється сірководень, який далі зв'язується шляхом абсорбції в протитоковому абсорбері. В якості абсорбенту може використовуватись моно- та діетаноламін, при цьому ефективність може сягати 99%. Також в якості абсорбенту можуть бути використані розчини солей лужних металів. Перевагою газифікації палива над процесами сіркоочищення є те, що в процесі газифікації не відбувається окиснення сірки, а утворюється сірководень. Його подальша переробка в елементарну сірку є більш економічно доцільною порівняно з переробкою діоксиду сірки [34].

2.2.2 Зв'язування сірки в процесі спалювання палива

Сірка може зв'язуватись в процесі горіння будь якого виду палива (твердого, рідкого або газоподібного) у котлах.

Найбільш поширеним способом є зв'язування сірки при спалюванні вугілля в киплячому шарі з введенням часток розмеленого вапняку (рис. 2.1). Киплячий шар утворюється за рахунок розміщення на нерухомій решітці суміші з подрібненого до 1,6–6 мм вугілля, вапняку та інертного матеріалу. В якості інертного матеріалу використовується пісок або зола.

Під решітку під тиском подається потік висхідного повітря, який підкидає частинки палива та інертного матеріалу, що і утворює киплячий шар. Реакції, що призводять до зв'язування сірки протікають при температурі 800–900⁰С. Спочатку карбонат кальцію CaCO_3 розкладається на двоокис вуглецю та оксид кальцію, далі CaO вступає в реакцію з сіркою з утворенням гіпсу (сульфату кальцію). Така схема може використовуватись і для спалювання сірчистого мазуту [6, 34].

Частина киплячого шару після поглинання сірки палива може подаватися на регенерацію з використанням продуктів згоряння, які підтримують

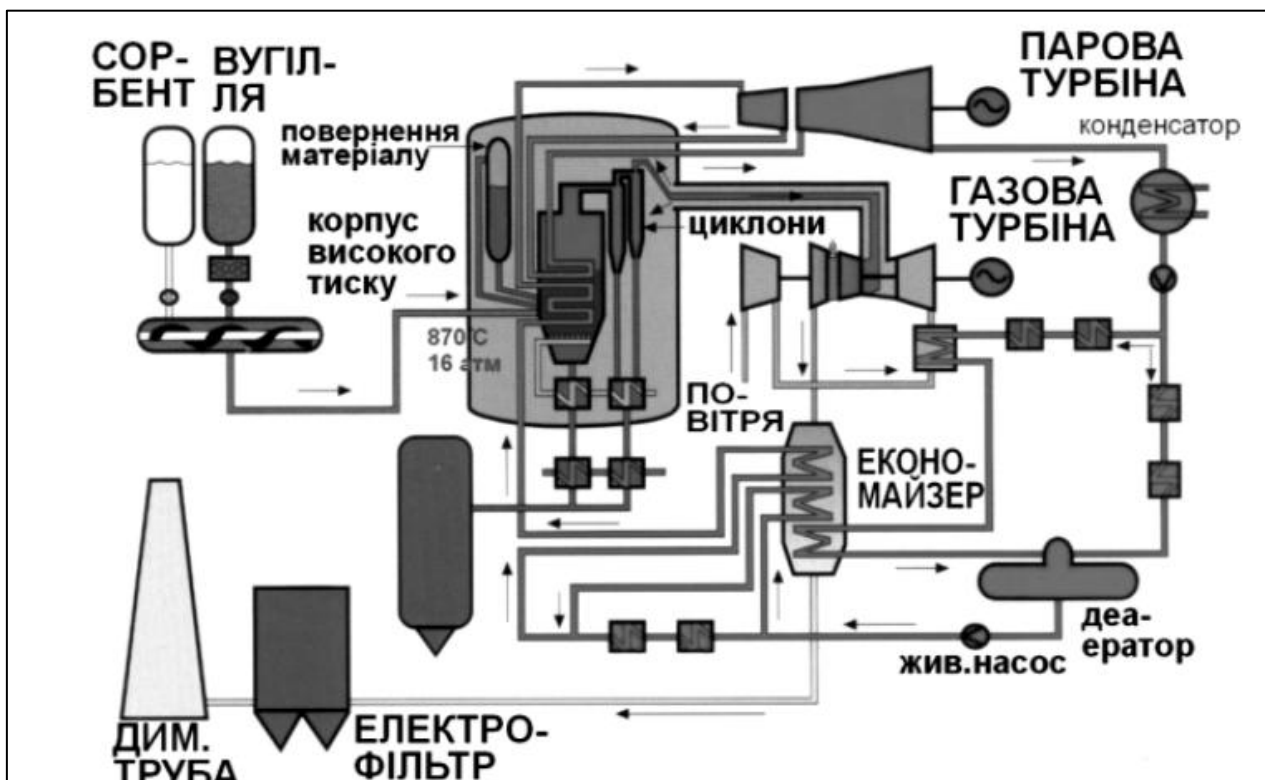


Рисунок 2.1 – Схема спалювання вугілля у киплячому шарі під тиском [36]

температуру $1000\text{--}1100^{\circ}\text{C}$ і забезпечують реакцію з відновлення оксиду кальцію та діоксиду сірки ($3\text{CaSO}_4 + \text{CaS} = 4\text{SO}_2 + 4\text{CaO}$). Оксид кальцію після регенерації повертається в топку котла, а діоксид сірки може бути використаний для виробництва H_2SO_4 [34].

Даний метод дозволяє підтримувати концентрацію діоксиду сірки у димових газах до 200 мг/нм^3 , що відповідає нормативам на викиди, встановленим у Директиві ЄС 2001/80/ЕС. Ступінь зв'язування сірки може досягати 80%. Ефективність зв'язування залежить від кількості вапняку, який безперервно подається в топку [6, 37].

2.2.3 Методи очистки димових газів від діоксиду сірки

Промислові методи десульфуризації димових газів поділяються на мокрі, напівсухі й сухі методи. Також використовуються методи спільного каталітичного очищення від оксидів сірки й азоту.

Сухі методи очистки димових газів від діоксиду сірки засновані на

процесі адсорбції – поглинанні SO_2 твердими сорбентами.

Процес адсорбції відбувається при незначному зниженні температури газів. В якості адсорбентів використовують речовини з поруватою структурою, що забезпечує розвинену поверхню контакту фаз. До таких речовин відносяться оксиди металів (алюміній, марганець, залізо, калій), активоване вугілля, кокс та напівкокс [30, 34]. Адсорбент подрібнюється до порошкоподібного стану та вдувається в котел, де відбувається реакція сорбції.

Прикладами сухої десульфурації є:

- застосування гашеного вапна з утворенням в результаті реакції вловлювання SO_2 сульфату кальцію або ангідриду кальцію [38];
- застосування активованого оксиду марганцю, який отримують шляхом обробки MnSO_4 аміаком, з утворенням в результаті реакції вловлювання SO_2 сульфату амонію. У подальшому утворений $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ може використовуватись у якості добрива [34].

До переваг методів сухої очистки відноситься висока ефективність очистки (до 98%) та можливість протікання процесу сорбції за високих температур, що надає змогу вводити сорбент безпосередньо в зону спалювання палива [30]. Недоліком є більш високі витрати адсорбенту, ніж при мокрих методах очистки [34].

Напівсухі методи є поєднанням мокрого та сухого способу очистки. Сутність методу полягає у вприскуванні суспензії абсорбенту, тобто відбувається зв'язування діоксиду сірки краплями абсорбенту. Рідина із суспензії випаровується з утворенням твердого кінцевого продукту. Утворений сухий порошок далі вловлюється в золовловлювачах. Температура протікання процесу повинна бути достатньою для того, щоб з одного боку забезпечити повне випаровування води, а з іншого – не опускатись нижче за точку роси [30, 39].

Найбільш поширеним напівсухим методом очистки димових газів ТЕС є очистка з використанням суспензії вапна з мольним співвідношенням $\text{Ca}/\text{S}=1,5$ в результатів якої утворюється у якості відходів суміш сульфіту та сульфату

кальцію та невикористаного вапна [38]. В якості сорбенту також може бути використаний аміак. В результаті очистки утворюється сульфат амонію, який є мінеральним добривом [30].

Напівсухі методи очистки здатні забезпечити ефективне очищення – до 98% [30]. Вони є достатньо простими і менше використовують теплової енергії на підігріву димових газів порівняно з мокрими способами очистки. Також не утворюються рідкі шлами [39].

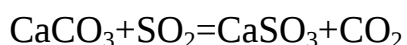
Недоліками напівсухих методів є значне енергоспоживання, висока вартість сорбенту, висока запиленість димових газів після процесу сорбції за рахунок утворення твердого кінцевого продукту реакції і необхідності його вловлювання, його низька цінність як товарної продукції [30, 39].

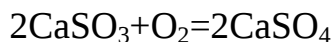
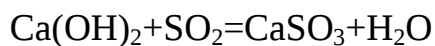
Методи мокрої десульфуризації є найбільш поширеними серед методів сіркоочищення. На їх долю приходить близько 85%, зокрема в Японії їх частка складає 98%, в США – 92%, в Німеччині – 90% [40].

Мокрі методи полягають в абсорбції SO_2 за допомогою розчинів лужних сорбентів та їх подальшою нейтралізацією [38]. В якості сорбентів використовуються сорбенти із лужними властивостями – вапняк CaCO_3 , вапно Ca(OH)_2 , сполуки натрію – натрію сульфід Na_2SO_3 , амоній сульфіту $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$, аміачна вода NH_4OH ($\text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$), морська вода [6, 30].

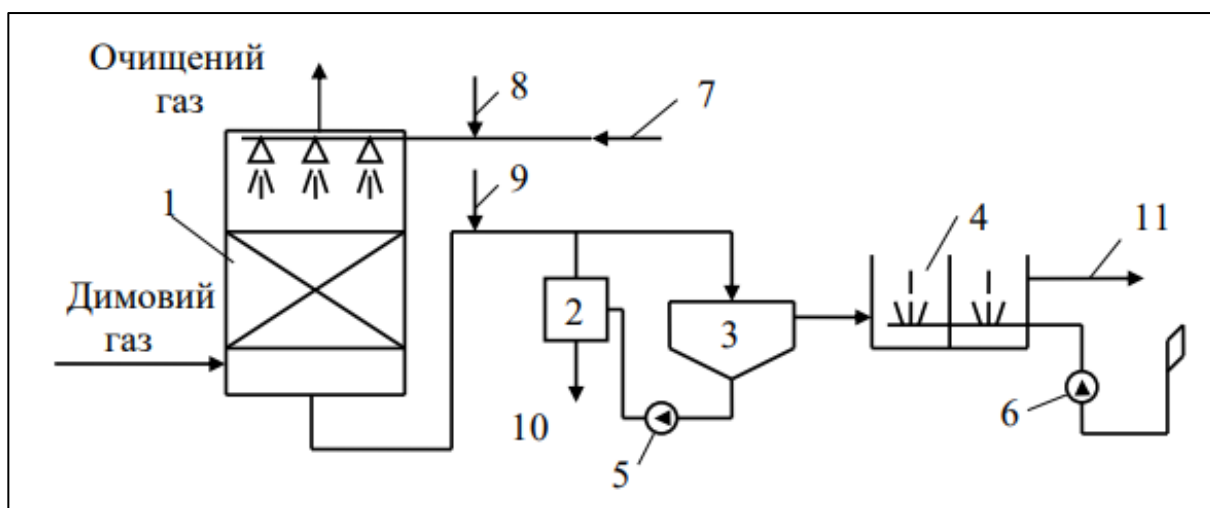
Вапняний та вапняковий методи передбачають використання в якості сорбентів вапна Ca(OH)_2 та вапняка CaCO_3 . Сутність методів полягає в тому, що димові гази інтенсивно промиваються розчином сорбенту в абсорбері. В результаті розчинення діоксиду сірки у воді утворюється сірчана кислота, яка далі нейтралізується гідроксидом кальцію або карбонатом кальцію. В результаті реакції утворюється сульфід кальцію, який далі, при пропусканні повітря через пульпу, окиснюється до сульфату кальцію (гіпсу) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ [6, 34, 40].

Зв'язування SO_2 відбувається за наступними хімічними реакціями [41]:





При реалізації вапняного методу димові газы попередньо очищуються від золи в золовловлювачі (рис. 2.2). Процес вловлювання та нейтралізації SO_2 відбувається в абсорбері (скрубєрі), в який подається суспензія води та дрібнозмолотого вапна. Газ після очистки подається у бризковловлювач, де відбувається сепарація крапель розчину з газового потоку. Для нейтралізації кислого розчину, що виходить з абсорбера, до нього додають свіжу вапняну суспензію. Для завершення процесу кристалізації гіпсу рідина витримується у спеціальних ємностях, далі вона подається на зрошення в абсорбер. Частина суспензії виводиться з циклу зрошення, згущується і накопичується у шламовібрінику. Утворений шлам вивозиться на відвал [34].



1 – абсорбер; 2 – фільтр; 3 – відстійник; 4 – аератор; 5 – шламовий насос; 6 – повітрودувка; 7 – річна вода; 8 – вапняне молоко; 9 – флокулятор; 10 – викид шламу; 11 – скид очищеної води у річку

Рисунок 2.2 – Схема вапняного методу очищення димових газів [34]

Вапняний метод може використовуватись при невисоких концентраціях SO_2 в димових газах, вапняковий – при високих концентраціях SO_2 на вході. Ефективність очистки може досягати 90%, зокрема, при очистці димових газів від палива з сірчистістю 3,5–4% вона складає 85–95% [34, 41].

Перевагою вапнякового процесу є доступність сировини і проста організація процесу. Одна при цьому недоліком є неповне використання

вапняка, що викликає утворення великих обсягів шламу, який важко утилізувати. При реалізації вапняного методу вапно використовується практично повністю, однак є небезпека забивання обладнання та комунікацій [39].

Перевагою обох методів є відносно невеликі обсяги капітальних та експлуатаційних витрат. Недоліками є велика витрата води на приготування суспензії, утворення великої кількості шламів та гіпсу, відсутність виходу товарної продукції, значне енергоспоживання [34, 38]. При використанні вапняного і вапнякового методів є можливість отримання товарного гіпсу [36, 39].

Процес Велмана-Лорда (содово-циклічний метод) відноситься до содових методів вловлювання діоксиду сірки і ґрунтується на використанні сіркокислотних солей натрію.

В основі методу лежить поглинання діоксиду сірки в абсорбері розчином сульфіту натрію Na_2SO_3 з утворенням NaHSO_3 , який далі знову регенерується до Na_2SO_3 .

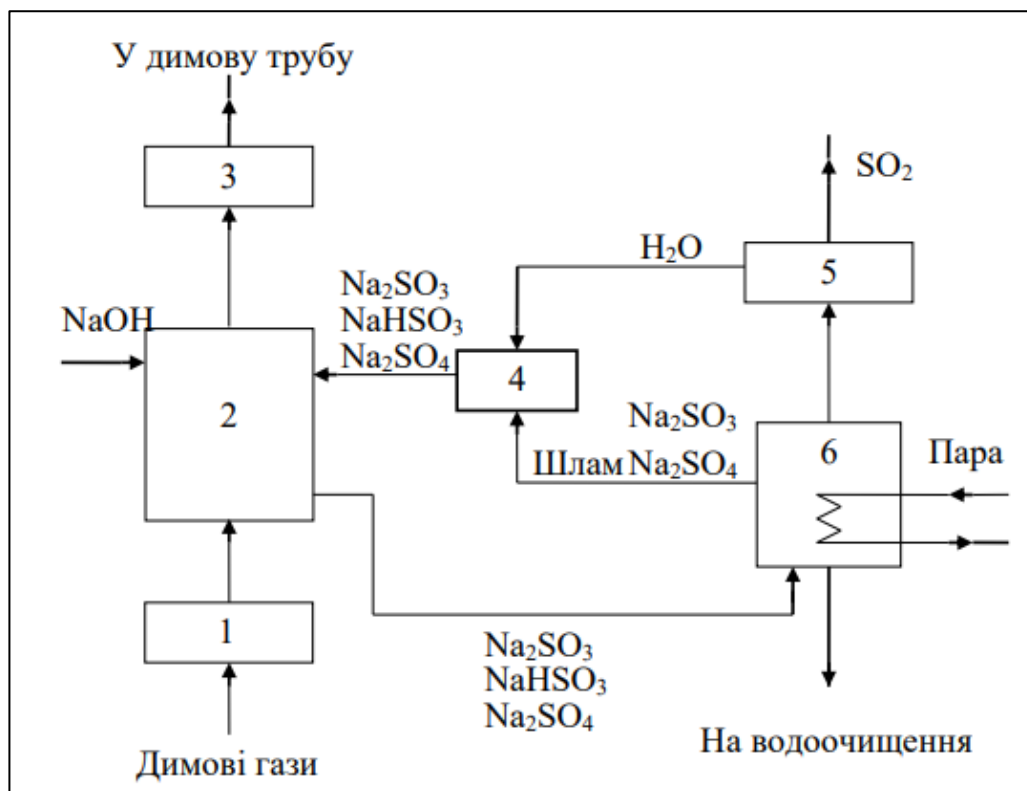
Зв'язування SO_2 відбувається за наступними хімічними реакціями:

– в абсорбері відбувається поглинання: $\text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NaHSO}_3$;

– в регенераторі – відновлення: $2\text{NaHSO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{SO}_2\uparrow + \text{H}_2\text{O}$.

Розчин бісульфіту натрію NaHSO_3 , що утворюється в абсорбері, збирається у збірнику, далі проходить підігрівач і надходить у випарник. Регенерація відбувається у кристалізаторі-випарнику при нагріві розчину NaHSO_3 до 100°C . В регенераторі NaHSO_3 розкладається на Na_2SO_3 та діоксид сірки. Упарений розчин розводиться конденсатом і знову спрямовується в абсорбер. Внаслідок окиснення частки діоксиду сірки утворюється неактивний Na_2SO_4 , що видаляється [34, 39].

Схема содово-циклічного методу очищення димових газів наведена на рис. 2.3.



1 – скруббер; 2 – абсорбер; 3 – підігрівник; 4 – розчинник; 5 – конденсатор; 6 – кристалізатор-випарник

Рисунок 2.3 – Схема содово-циклічного методу очищення димових газів [34]

Ступінь очистки від діоксиду сірки є високим – більше 90%.

Процес Велмана-Лорда є простим і надійним процесом, однак для ТЕС цей спосіб доцільно використовувати у випадку проведення регенерації на спеціальному хімічному виробництві. До основних недоліків методу відноситься постійна витрата димових газів, значне енергоспоживання і значні обсяги утворених солей натрію [34, 34, 42].

Аміачні методи очистки димових газів засновані на реакції діоксиду сірки з водними розчинами сульфату амонію [43].

Аміачні методи відрізняються умовами процесу. Спільним є перший етап – поглинання SO_2 водним розчином сульфату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_3$, в результаті чого утворюється гідросульфат амонію NH_4HSO_3 за реакцією $\text{SO}_2 + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} = 2\text{NH}_4\text{HSO}_3$. Далі процес відрізняється залежно від напрямів переробки NH_4HSO_3 . Він може розкладатися кислотним, автоклавним, циклічним або нециклічним методами. При аміачно-автоклавному методі

$2\text{NH}_4\text{HSO}_3$ розкладається у автоклаві. В результаті процесу отворюються товарна сірка та сульфат амонію [41, 43].

Перевагами аміачних методів є їх відносна економічність та високий ступінь очистки. Висока розчинність сульфіту амонію дозволяє знизити розміри апарату та кількість утворюваних стічних вод. Утворений сульфат амонію може використовуватись як добриво [38, 41, 44].

Недоліком є необхідність використання аміаку, який є токсичним і потребує обережного зберігання та транспортування. Крім того, аміак є достатньо дефіцитним продуктом [38, 43].

Каталітична очистка передбачає спільну очистку від оксидів сірки і азоту (технології DESONOX та SNOX). Сутність процесів полягає у введенні в димові гази аміаку. На відстані в 0,5–1,5 м від зони економайзера, куди вводиться аміак, встановлюється касета з каталізатором (ванадієвим або іншим) [42].

РОЗДІЛ 3. ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ДЕСУЛЬФУРИЗАЦІЇ ВИКИДІВ ВІД КОТЛОАГРЕГАТІВ

Згідно з Національним планом скорочення викидів від великих спалювальних установок (далі – Національний план) [3] на момент його прийняття у 2017 р. в Україні працювало 223 великі спалювальні установки загальною номінальною тепловою потужністю близько 116 ГВт.

Згідно Національного плану, протягом його планованого терміну дії (до 31.12.2033 р.) оператори 90 великих спалювальних установок (ТЕС, ТЕЦ та котельні) повинні вжити заходи щодо скорочення кількості викидів діоксиду сірки в 20 разів порівняно з початковим періодом.

Для спалювальних установок з тепловою потужністю 50–500 МВт пропонується використання вугілля з низьким вмістом сірки та будівництво установок напівсухого або мокрого сіркоочищення димових газів, для установок з тепловою потужністю більше 500 МВт – застосування установок мокрого сіркоочищення.

3.1 Розрахунок викидів діоксиду сірки від котла ТПП-210А

Котли типу ТПП-210А використовуються на Трипільській [45] та Зміївській [46] ТЕС.

Котел ТПП-210А є пиловугільним котлом, в якому використовується антрацит. Паропродуктивність котла складає 950 т/год. Котел є прямотоковим, симетричним та складається з двох корпусів. Кожен корпус – це самостійний агрегат з паропродуктивністю 475 т. Котел має П-подібну компоновку. Паливня розділена на камеру згоряння і камеру охолодження. Шлаковидалення – рідке, що забезпечується наявністю перетиску для створення необхідних умов [45, 47, 48].

Для подальшого обґрунтування вибору технології десульфуризації виконаємо розрахунок викидів діоксиду сірки від котла типу ТПП-210А (витрата антрациту 120 т/год) з використанням мокрої вапнякової очистки,

мокрої содової очистки (процес Велмана-Лорда) та напівсухої очистки з використанням суспензії вапна.

Розрахунок викидів діоксиду сірки виконується відповідно до ГКД 34.02.305-2002 «Викиди забруднювальних речовин в атмосферу від енергетичних установок» [31], який визначає порядок розрахунку викидів забруднюючих речовин з димовими газами від енергетичних установок, що спалюють органічне паливо (вугілля, мазут, природний газ).

Відповідно до методики [31]:

а) валовий викид діоксиду сірки розраховується за формулою:

$$E = 10^{-6} \cdot k_{SO_2} \cdot B_i \cdot Q^r, \quad (3.1)$$

де k_{SO_2} – показник емісії діоксиду сірки, г/Гдж;

B_i – витрата палива за проміжок часу, т, $B_i = 120$ т/год ;

Q^r – нижча робоча теплота згоряння палива, МДж/кг,
 $Q^r = 16,39$ МДж/кг [49].

б) показник емісії діоксиду сірки розраховується за формулою:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{Q^r} \cdot \frac{2S^r}{100} \cdot (1 - \eta_1)(1 - \eta_{11} \cdot \beta), \quad (3.2)$$

де S^r – вміст сірки в паливі на робочу масу, %. Для антрацитового штибу $S^r = 2,4\%$;

η_1 – ефективність зв'язування сірки золою або сорбентом в енергетичній установці, $\eta_1 = 0,05$;

η_{11} – ефективність очистки димових газів від оксидів сірки. Для мокрої вапнякової очистки $\eta_{11} = 0,95$, мокрої содової очистки (процес Велмана-Лорда) $\eta_{11} = 0,94$, напівсухої очистки з використанням суспензії вапна $\eta_{11} = 0,9$;

β – коефіцієнт роботи сіркоочисної установки. Для мокрої вапнякової

очистки $\beta = 0,99$, мокрої содової очистки (процес Велмана-Лорда) $\beta = 0,99$, напівсухої очистки з використанням суспензії вапна $\beta = 0,99$.

Обсяг викиду без очистки:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{16,39} \cdot \frac{2 \cdot 2,4}{100} \cdot (1 - 0,05)(1 - 0 \cdot 0) = 2782,184 \text{ г/Гдж}$$

$$E = 10^{-6} \cdot 2782,184 \cdot 120 \cdot 16,39 = 5,471 \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Для мокрої вапнякової очистки:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{16,39} \cdot \frac{2 \cdot 2,4}{100} \cdot (1 - 0,05)(1 - 0,95 \cdot 0,99) = 165,540 \text{ г/Гдж}$$

$$E = 10^{-6} \cdot 165,540 \cdot 120 \cdot 16,39 = 0,325 \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Для процесу Велмана-Лорда:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{16,39} \cdot \frac{2 \cdot 2,4}{100} \cdot (1 - 0,05)(1 - 0,94 \cdot 99) = 193,084 \text{ г/Гдж}$$

$$E = 10^{-6} \cdot 165,540 \cdot 120 \cdot 16,39 = 0,380 \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Для напівсухої очистки з використанням суспензії вапна:

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{16,39} \cdot \frac{2 \cdot 2,4}{100} \cdot (1 - 0,05)(1 - 0,9 \cdot 0,99) = 303,258 \text{ г/Гдж}$$

$$E = 10^{-6} \cdot 303,258 \cdot 120 \cdot 16,39 = 0,596 \frac{\text{т}}{\text{год}}$$

Як показує розрахунок, найменший валовий викид спостерігається при використанні мокрої вапнякової очистки, найбільший – при використанні напівсухої очистки з використанням суспензії вапна.

3.2 Вибір технології десульфуризації викидів

3.2.1 Методологія методу аналізу ієрархій (MAI)

Для обґрунтування вибору технології десульфуризації викидів використаємо метод аналізу ієрархій (MAI).

Метод аналізу ієрархій відноситься до експертних методів прийняття рішень. Він дозволяє вирішувати різнотипні слабкоструктуровані задачі прийняття рішень в умовах наявності багатьох критеріїв, що обумовлюють

вибір з декількох варіантів.

Основою методу є структурування проблеми вибору або задачі прийняття рішення у вигляді багаторівневої ієрархії, в якій відображається вирішувана задача, критерії та варіанти її вирішення (альтернативи). В основу побудови ієрархії покладено принцип, що на верхньому рівні відображено головну ціль (конкретну задачу), для якої на нижніх рівнях деталізуються способи її формування (альтернативи) [50, 51].

Реалізація МАІ передбачає послідовне виконання наступних етапів [50, 52–54]:

Етап 1. Побудова багаторівневої ієрархії. Найпростіша ієрархія будується починаючи з мети, що розташовується на її вершині, другий рівень – це критерії, третій рівень – альтернативи.

Етап 2. Визначення пріоритетів всіх елементів ієрархії на основі парних порівнянь. При виконанні цього етапу складаються:

– квадратні матриці попарних порівнянь альтернатив за кожним критерієм на основі дев'ятибальної шкали (табл. 3.1). Кожна клітинка матриці (елемент матриці a_{ij}) виражає відносну цінність i -ї альтернативи у порівнянні з іншою j -ю альтернативою відповідно до кожного критерію. Якщо альтернатива i переважає над альтернативою j , то елемент матриці a_{ij} заповнюється цілим числом, у зворотній ситуації – оберненим числом. Якщо альтернативи, які порівнюються, є рівнозначними за критерієм, то в елемент матриці ставиться 1. Матриця є обернено симетричною;

Таблиця 3.1 – Шкала відносної важливості елементів ієрархії

Ступінь значущості	Визначення значущості
1	однакова
3	помірна перевага
5	істотна перевага
7	дуже сильна або очевидна значущість
9	абсолютна перевага
2,4,6,8	проміжні рішення між сусідніми судженнями

– матриця відносної важливості критеріїв, яка заповнюється за аналогічними до побудови матриці альтернатив правилами.

Етап 3. У кожній матриці суджень альтернатив та матриці відносної важливості критеріїв по кожному рядку знаходимо середню геометричну суму, тобто визначаємо нормалізований вектор локальних пріоритетів.

Для оцінки кожної альтернативи визначається її вага шляхом ділення середнього геометричного значення рядка на загальну суму рядків, тобто нормування компоненти нормалізованого вектора.

Етап 4. Визначається підсумкова оцінка кожної альтернативи як сума добутків її оцінки по кожному критерію на відносну вагу цього критерію. Далі альтернативи ранжуються за спаданням значення підсумкової оцінки. Альтернатива, що має найбільше значення підсумкової оцінки вважається найкращою.

Етап 5. Виконується перевірка узгодженості кожної матриці альтернатив.

Для цього:

- для кожної альтернативи множимо відповідний елемент матриці суджень на отриману оцінку вектора рішення. Отримується новий вектор, що має назву Адамаров вектор;
- розраховується вектор узгодженості шляхом ділення кожної компоненти Адамарова вектора на відповідну оцінку вектора рішення;
- розраховується величина, що характеризує найбільше власне значення матриці суджень – максимальне (головне) власне значення $\lambda_{\max}$ шляхом ділення суми компонент вектора узгодженості на число компонент n ;
- розраховується індекс узгодженості ІУ за формулою:

$$IU = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}. \quad (3.3)$$

Матриця вважається узгодженою, якщо її $\lambda_{\max}$ та число компонент n співпадають;

- для перевірки того, наскільки індекс узгодженості відображає узгодженість суджень, розраховують також випадковий індекс узгодженості

ВУ як відношення індексу узгодженості ІУ на значення випадкового індексу ВІ. Для кількості компонент $n=3$, випадковий індекс $ВІ = 0,58$. Узгодженість вважається задовільною у тому випадку, коли значення випадкового індексу ВІ є меншим за 0,1 або дорівнює йому. Якщо $ВІ > 0,1$, то слід перевірити або переглянути оцінку порівняння пар альтернатив.

3.2.2 Вибір оптимального способу десульфуризації газів від котла

Відповідно до методології МАІ спочатку повинна бути сформульована мета, визначені відповідні альтернативи (варіанти вирішення проблеми) і критерії, що допомагають зробити вибір.

Мета – вибір оптимального способу десульфуризації димових газів від котла ТПП-210А.

Грунтуючись на аналізі існуючих методів очистки димових газів, що утворюються при спалюванні палива в котлоагрегатах, від діоксиду сірки (п. 2.3.3) та рекомендаціях «Національного плану скорочення викидів від великих спалювальних установок» [3] щодо методів десульфуризації димових газів, що викидаються від котлоагрегатів, в якості методів скорочення викидів (альтернатив) обрано 3 методи десульфуризації:

- мокра вапнякова очистка;
- мокра содова очистка (процес Велмана-Лорда);
- напівсуха очистка з використанням суспензії вапна.

Грунтуючись на аналізі наукових публікацій та навчальної літератури щодо сутності та особливостей методів десульфурації димових газів (п. 2.3.3), та результатів розрахунку викидів від котла ТПП-210А (п. 3.1) в якості критеріїв, за якими буде здійснюватись порівняльна оцінка, обрано наступні:

- ефективність – показники, що характеризують ступінь скорочення викидів діоксиду сірки (наведені у табл. 3.2);
- доступність сировини – показники, що характеризують можливість вільного придбання сировини та її вартість (наведені у табл. 3.3);
- поводження з відходами – показники, що характеризують складність утилізації відходів (наведені у табл. 3.4).

Таблиця 3.2 – Показники, що характеризують ефективність

Метод десульфуризації димових газів	Потенційний ступінь очистки від діоксиду сірки, %	Скорочення показника емісії SO ₂ від котла ТПП-210А, %
мокра вапнякова очистка	> 98 [38, 44]	94%
процес Велмана-Лорда	> 90 % [34]	93%
напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	90–95 [38, 44]	89%

Таблиця 3.3 – Показники, що характеризують доступність сировини

Метод десульфуризації димових газів	Назва сировини	Доступність	Вартість, \$/(нм ³ /год) [38, 44]
мокра вапнякова очистка	вапняк	так	9,5 – 15,85
процес Велмана-Лорда	каустична сода	так	63,4 – 82,4
напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	вапно	так	38 – 47,55

Таблиця 3.4 – Показники, що характеризують поводження з відходами

Метод десульфуризації димових газів	Обсяги утворюваних відходів	Товарна продукція
мокра вапнякова очистка	великі обсяги шламів, що важко утилізуються	товарний гіпс, що може бути реалізований
процес Велмана-Лорда	значні обсяги утворюваних солей натрію	сульфат натрію низької якості
напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	суміш сульфїту та сульфату кальцію та невикористаного вапна, не утворюються рідкі шлами	не утворюється

Ієрархія вибору оптимального способу десульфуризації димових газів наведена на рис. 3.1.

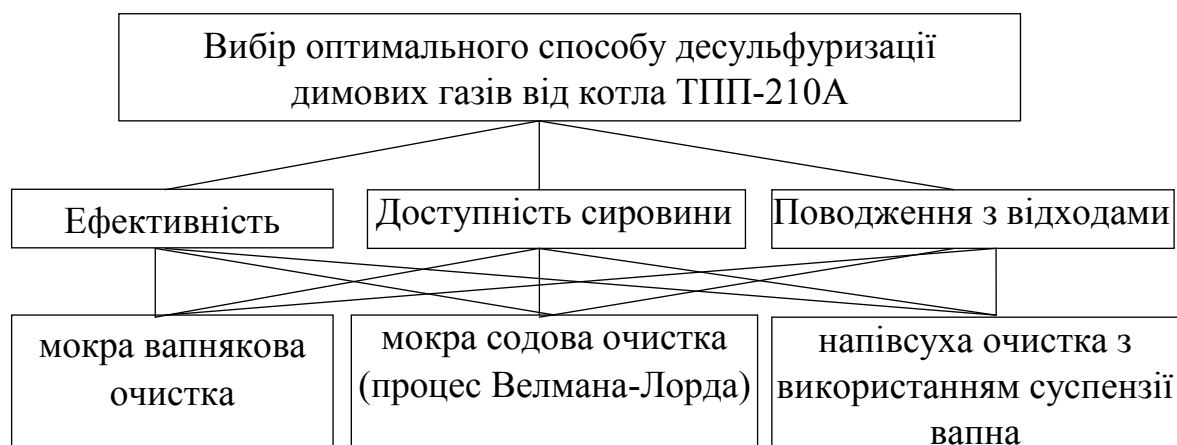


Рисунок 3.1 – Ієрархія вибору оптимального способу десульфуризації димових газів

Всі розрахунки виконувались з використанням додатку Microsoft Excel.

Матриці порівнянь та оцінки альтернатив за кожним критерієм та матриця відносної важливості критеріїв наведені у табл. 3.5–3.8.

Таблиця 3.5 – Оцінка альтернатив за критерієм ефективності

Альтернативи	Мокра вапнякова очистка	Процес Велмана-Лорда	Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	Середнє геометричне	Оцінка
Мокра вапнякова очистка	1	3	4	2,2894	0,6250
Процес Велмана-Лорда	1/3	1	2	0,8736	0,2385
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	1/4	1/2	1	0,5000	0,1365

Таблиця 3.6 – Оцінка альтернатив за критерієм доступності сировини

Альтернативи	Мокра вапнякова очистка	Процес Велмана-Лорда	Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	Середнє геометричне	Оцінка
Мокра вапнякова очистка	1	8	5	3,4200	0,7334
Процес Велмана-Лорда	1/8	1	1/4	0,3150	0,0675
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	1/5	4	1	0,9283	0,1991

Таблиця 3.7 – Оцінка альтернатив за критерієм поводження з відходами

Альтернативи	Мокра вапнякова очистка	Процес Велмана-Лорда	Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	Середнє геометричне	Оцінка
Мокра вапнякова очистка	1	3	5	2,4662	0,6370
Процес Велмана-Лорда	1/3	1	3	1,0000	0,2583
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	1/5	1/3	1	0,4055	0,1047

Таблиця 3.8 – Порівняльний аналіз критеріїв

Критерії	Ефективність	Доступність сировини	Поводження з відходами	Середнє геометричне	Оцінка
Ефективність	1	3	1	1,4422	0,3879

Критерії	Ефективність	Доступність сировини	Поводження з відходами	Середнє геометричне	Оцінка
Доступність сировини	1/3	1	1/7	0,3625	0,0975
Поводження з відходами	1	7	1	1,9129	0,5146

Таблиця 3.9 – Підсумкова оцінка альтернатив

Критерій Метод	Ефективність	Доступність сировини	Поводження з відходами	Підсумкова оцінка
Мокра вапнякова очистка	0,2425	0,0715	0,3278	0,6417
Процес Велмана-Лорда	0,0925	0,0066	0,1329	0,2320
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	0,0530	0,0194	0,0539	0,1263

Найбільшу підсумкову оцінку має альтернатива мокра вапнякова очистка. Таким чином можна зробити висновок, що оптимальним способом десульфуризації димових газів від котла є саме вона.

Перевіряємо узгодженість кожної матриці альтернатив. Результати перевірки наведені у табл. 3.10–3.12.

Таблиця 3.10 – Перевірка узгодженості матриці альтернатив за критерієм ефективності

Альтернативи	Оцінка	Адамаров вектор	Узгодженість
Мокра вапнякова очистка	0,6250	1,89	3,0183
Процес Велмана-Лорда	0,2385	0,72	3,0183
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	0,1365	0,41	3,0183
$\lambda_{\max}$	3,0183		
Індекс узгодженості ІУ	0,0091		
Випадковий індекс узгодженості ВУ	0,0158		

Таблиця 3.11 – Перевірка узгодженості матриці альтернатив за критерієм доступності сировини

Альтернативи	Оцінка	Адамаров вектор	Узгодженість
Мокра вапнякова очистка	0,7334	2,27	3,0940
Процес Велмана-Лорда	0,0675	0,21	3,0940
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	0,1991	0,62	3,0940
$\lambda_{\max}$	3,0940		
Індекс узгодженості ІУ	0,047		
Випадковий індекс узгодженості ВУ	0,081		

Таблиця 3.12 – Перевірка узгодженості матриці альтернатив за критерієм поводження з відходами

Альтернативи	Оцінка	Адамаров вектор	Узгодженість
Мокра вапнякова очистка	0,6370	1,9355	3,0385
Процес Велмана-Лорда	0,2583	0,7848	3,0385
Напівсуха очистка з використанням суспензії вапна	0,1047	0,3182	3,0385
$\lambda_{\max}$	3,0385		
Індекс узгодженості ІУ	0,0193		
Випадковий індекс узгодженості ВУ	0,0332		

У всіх випадках оцінки є узгодженими, оскільки значення ВУ є меншим за 0,1.

Таким чином можна визначити, що за результатами експертної оцінки з використанням методології методу аналізу ієрархій оптимальним методом десульфуризації викидів від котла ТПП-210А є мокра вапнякова очистка.

РОЗДІЛ 4. ЕКОЛОГІЧНИЙ ПОДАТОК

Екологічний податок – це загальнодержавний обов’язковий платіж, що стягується з платників податків у тому випадку, коли вони здійснюють викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення, скид стічних вод безпосередньо у водні об’єкти, розміщують відходи, утворюють та тимчасово зберігають радіоактивні відходи [55].

Відповідно до статті 249.3 Податкового кодексу України [55] сума екологічного податку за викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення розраховується за формулою:

$$П_{ВС} = \sum_{i=1}^n (M_i \cdot Н_{pi}) \quad (4.1)$$

де M_i - фактичний обсяг викиду i -тої забруднюючої речовини в тоннах;
 $Н_{pi}$ - ставки податку в поточному році за тонну i -тої забруднюючої речовини у гривнях з копійками.

Ставки податку визначаються за статтею 243 Податкового Кодексу та для діоксиду азоту $Н_{pi} = 2574, 43$ грн/т.

Екологічний податок за викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення для викидів від котла ТПП-210А розраховано для обсягу викидів, наведених у п. 3.1.

Результати розрахунку наведено у табл. 4.1.

Згідно розрахунку податку, найменшою є сума екологічного податку за викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами від мокрої вапняної очистки, яка складає 7329402,21 грн/рік.

Таблиця 4.1 – Розрахунок екологічного податку за викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами

Викиди	Обсяг викидів, т/год/т/рік	Ставка податку, грн/т	Сума податку, грн/рік
Викид без сіркоочистки	5,417 / 47 452,92	2574, 43	122164220,84
Викид при використанні мокрої вапнякової очистки	0,325 / 2847		7329402,21
Викид при використанні процесу Велмана-Лорда	0,38 / 3328,8		8569762,58
Викид при використанні напівсухої очистки з використанням суспензії вапна	0,596 / 5220,96		13440996,05

ВИСНОВКИ

1. Діоксид сірки є забруднюючою речовиною, вміст якої в атмосферному повітрі обов'язково підлягає контролю. Його підвищений вміст в атмосферному повітрі негативно впливає на здоров'я людини та компоненти довкілля. У організмі людини SO_2 викликає низку порушень обмінних процесів, порушення у роботі кровеносної та ендокринної систем. Діоксид сірки є причиною утворення кислотних дощів. Також він негативно впливає на рослини, пригнічуючи процеси фотосинтезу.

2. Природними джерелами надходження SO_2 в атмосферу є виверження вулканів, процеси окиснення сірки та розсіянні в морі сульфати. Основними антропогенними джерелами є хімічна, металургійна, харчова, паперова промисловості, процеси спалювання в теплоенергетиці та виробництво будматеріалів. Найбільша кількість викидів діоксиду сірки приходить на долю нергетики, чорної металургії та вугільної промисловості.

3. Переважна частка у викидах діоксиду сірки в атмосферне повітря належить стаціонарним джерелам забруднення і коливається в межах 97-99%. Найбільша кількість викидів SO_2 від стаціонарних джерел приходить на 2011-2013 р.р, після чого спостерігається скорочення загальної кількості викидів. Для питомих викидів спостерігається та ж сама тенденція. Найбільші обсяги викидів відбувались з території Івано-Франківської та Дніпропетровської областей (60,2% у 2024 р.). Найбільша кількість викидів за даними держстатистики відбувається від процесів спалювання в енергетичній галузі промисловості, переробній промисловості та будівництві, в малих установках (96,6% від загальної кількості викидів).

4. Моніторинг вмісту діоксиду сірки в населених пунктах здійснюється гідрометеорологічними службами на стаціонарних постах спостережень. Згідно оприлюднених даних, середній вміст SO_2 знаходиться в межах 0,34–0,38 долей ГДКсд. У 3% міст спостерігається перевищення 1 ГДКсд. На основі розрахунку середньої концентрації SO_2 згідно відкритих щомісячних даних для 33 міст

України за період грудень 2023–листопад 2024 р.р. визначено, що перевищення ГДК спостерігається для м. Київ та Суми.

5. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря діоксидом сірки показала, що насторожуючий рівень ризику встановлений для м. Київ, цільовий (мінімальний) рівень ризику встановлений для 10 населених пунктів (Вінниця, Івано-Франківськ, Луцьк, Львів, Миколаїв, Полтава, Рівне, Тернопіль, Херсон, Чернівці), для інших населених пунктів рівень ризику є допустимим.

6. У загальних викидах сірки від теплоенергетики на долю діоксиду сірки приходить 98–99%. Наявність SO_2 у викидах від об'єктів теплоенергетики обумовлена процесами спалювання твердого (вугілля) та рідкого (мазут) палива, внаслідок того, що сірка міститься у цих видах палива. Обсяг викиді залежить від сірчистості палива та технології спалювання.

7. Скорочення обсягів викиду SO_2 досягається за рахунок знесірювання палива, зв'язування сірки в процесі спалювання палива та очистки димових газів від вже утвореного SO_2 .

Метою знесірювання палива є скорочення вмісту сірки у вихідному паливі, яке подається до котлів. Десульфуризація вугілля здійснюється фізичними та хімічними методами, а також за допомогою мікроорганізмів, мазуту – шляхом гідрогенізації нафти на нафтопереробних заводах.

Зв'язування сірки у процесі горіння можливе при використанні будь-якого виду палива. Найбільш поширеним є зв'язування сірки при спалюванні вугілля в киплячому шарі з введенням часток розмеленого вапняку. Використання цього методу дозволяє підтримувати концентрацію діоксиду сірки у димових газах до 200 мг/нм^3 .

Промислові методи десульфуризації димових газів поділяються на мокрі, напівсухі й сухі методи.

Сухі методи очистки димових газів від діоксиду сірки засновані на процесі адсорбції – поглинанні SO_2 твердими сорбентами (гашене вапно або активований оксид марганцю), що вдувається безпосередньо в зону

спалювання. Переваги методів – висока ефективність очистки та можливість протікання процесу сорбції за високих температур, що надає змогу вводити сорбент безпосередньо в зону спалювання палива. Недолік – більш висока витрати адсорбенту, ніж при мокрих методах очистки.

Напівсухі методи полягають у вприскуванні суспензії абсорбенту та зв'язуванні SO_2 краплями абсорбенту (сорбенти – суспензія вапна, аміак). Найбільш поширеним методом є очистка з використанням суспензії вапна з мольним співвідношенням $\text{Ca/S}=1,5$. Переваги методів – високий ступінь очистки, відсутність утворення шламів, відносна простота та менша витрата енергії на підігрів відходящих газів, ніж у мокрих методів. Недоліки – високе споживання електроенергії, висока вартість сорбенту, висока запиленість димових газів, низька цінність кінцевого продукту реакції як товарної продукції.

Мокрі методи є найбільш широко поширеними методами сіркоочищення. Вони полягають в абсорбції SO_2 за допомогою розчинів лужних сорбентів та їх подальшою нейтралізацією (сорбенти – вапняк, вапно, натрію сульфат, амонію сульфат, аміачна вода, морська вода).

Мокрі та напівсухі методи є більш ефективними. Національним планом скорочення викидів від великих спалювальних установок рекомендовано використання саме таких типів методів.

8. Розрахунок викидів діоксиду сірки від котла типу ТПП-210А (витрата антрациту 120 т/год) з використанням мокрої вапнякової очистки, мокрої содової очистки (процес Велмана-Лорда) та напівсухої очистки з використанням суспензії вапна показав, що найменший обсяг викидів спостерігається при використанні мокрої вапнякової очистки, найбільший – при використанні напівсухої очистки з використанням суспензії вапна.

9. Для обґрунтування вибору оптимального способу десульфуризації димових газів від котла ТПП-210А використано експертний метод аналізу ієрархій (MAI).

В якості методів скорочення викидів (альтернатив) обрано 3 методи

десульфуризації – мокра вапнякова очистка. мокра содова очистка (процес Велмана-Лорда), напівсуха очистка з використанням суспензії вапна.

В якості критеріїв для проведення оцінки обрано ефективність, доступність сировини та поводження з відходами.

За результатами оцінки встановлено, що оптимальним методом десульфуризації викидів від котла ТПП-210А є мокра вапнякова очистка.

10. Розраховано суму екологічного податку за викиди діоксиду сірки в атмосферне повітря від котла ТПП-210А при використанні різних методів очистки викидів. Згідно розрахунку податку, найменшою є сума екологічного податку за викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами від мокрої вапняної очистки, яка складає 7329402,21 грн/рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 р. Закон України від 28.02.2019 р. № 2697–VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#n14> (дата звернення: 25.05.2026).
2. Мілліверта Л., Гренс Р. Вплив викидів українських вугільних станцій на здоров'я населення. CREA. 2021. 22 с. URL: <https://ecoaction.org.ua/wp-content/uploads/2021/09/Coal-Health-Impacts-in-Ukraine-UA.pdf> (дата звернення: 25.05.2026).
3. Про національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 р. № 796-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/796-2017-%D1%80#Text> (дата звернення: 25.05.2026).
4. Панайотова Т. Д. Конспект лекцій з дисципліни «Загальна та неорганічна хімія» (для студентів 1 курсу денної та заочної форм навчання спеціальності 101 – Екологія) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 118 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/46281/1/2017%20%D0%BF%D0%B5%D1%87.%2093%D0%9B.pdf> (дата звернення: 26.05.2026).
5. Зацеркляний М.М., Зацеркляний О.М., Столевич Т. Б. Процеси захисту навколишнього середовища: підручник. Одеса: Фенікс, 2017. 312 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Zatser_2017_454.pdf (дата звернення: 26.05.2026).
6. Жданюк Н. В., Племянніков М. М. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів у виробництві кераміки та скла. Паливо і його характеристики. Розрахунки горіння палива: навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 922 Мбайт). Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 62 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/96385dca-cc6a-4c0d-b618-3950db567490/content> (дата звернення: 28.05.2026).

7. Бобильов Ю. П. та ін. Екологія: підручник. Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара. Харків: «Фоліо», 2014. 627 с. URL: <https://ekhnuir.karazin.ua/items/1ecac6eb-6607-4920-99b5-7b0045d02ad2> (дата звернення: 29.05.2026)

8. Бекетов В. Є., Євтухова Г. П. Джерела та процеси забруднення атмосфери. Модуль 1 Джерела та процеси забруднення атмосфери: конспект лекцій для студентів 3 курсу денної та заочної форм навчання спеціальності 101 – Екологія). Харків: ХНУМГ ім. О. Н. Бекетова, 2019. 113 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/53793/1/2019%20%D0%BF%D0%B5%D1%87.%2050%D0%9B%20..pdf> (дата звернення: 27.05.2026)

9. Кучерявий В. П. Загальна екологія: підручник. Львів: Світ, 2010. 520 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/Kucheryaviy_2010_520.pdf (дата звернення: 27.05.2026)

10. Фалько В. В. Оцінка гарантованої якості атмосферного повітря для рослин на прикладі парку ім. Т. Г. Шевченка, м. Дніпро. *Екологічні науки*. 2022. № 6(45). С. 153–157. URL: <http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/6/24.pdf> (дата звернення: 29.05.2026)

11. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 10.05.2024 р. № 813. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0763-24#Text> (дата звернення: 26.05.2026)

12. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря: постанова Кабінету Міністрів України від 14.08.2019 р. № 827. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF?find=1&text=%D1%81%D0%BF%D0%B8%D1%81%D0%BA%D1%83+%D0%90#Text> (дата звернення: 27.05.2026)

13. Заверуха Н.М., Серебряков В.В., Скиба Ю.А. Основи екології: навч. посібн. Київ: Каравела, 2006. 368 с. URL: https://dkrkm.org.ua/NMK/Zarbalieva/Studmed.ru_zaveruha-nm-serebryakov-vv-

[skiba-yua-osnovi-ekologyi_bb38b820ffc.pdf](#) (дата звернення: 30.05.2026)

14. Артем'єв С. Р., Малько О. Д., Шароватова О. П., Бригада О. В., Цимбал Б. М., Ковальов О. С., Ільїнський О. В. Культура безпеки: навч. посіб. Частина 2. Харків: НУЦЗУ, 2021. 133 с.

URL: <https://repositsc.nuczu.edu.ua/bitstream/123456789/13701/1/%D0%9A%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0%20%D0%B1%D0%B5%D0%B7%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D0%B8%20%D1%87%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BD%D0%B0%202..pdf> (дата звернення: 30.05.2026)

15. Комар С. В., Ніколенко М. Г., Леонтович В. П., Мазнева Н. П., Пархоменко Л. О. Основи екології: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2011. 300 с.

URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2341/1/%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf> (дата звернення: 30.05.2026)

16. Самойленко Н. М., Аверченко В. І., Байрачний В. Б. Системи технологій та промислова екологія. Ч.1. Металургійний та енергетичний комплекс: навч. посіб. Харків: НТУ «ХП», Лідер, 2020. 212 с. URL:

<https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/317da107-d327-40ae-a36b-e21f806745cf/content> (дата звернення: 01.06.2026)

17. Мальований М. С., Боголюбов В. М., Шаніна Т. П., Шмандій В. М., Сафранов Т. А. Техноекологія: підручник / ред. М. С. Мальований. Львів: Нпціональний університет «Львівська політехніка», 2013. 424 с.

URL: https://www.kdu.edu.ua/new/PHD_vid/PIDRUCHNIK_TE.pdf (дата звернення: 01.06.2026)

18. Новицький І. Ю., Перов М. М., Макортецький М. М. Оцінка впливу підприємств вугільної промисловості на довкілля. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. № 1. С. 59–63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/PZE_2019_1_11 (дата звернення: 29.05.2026).

19. Бочкова С. та ін. Забруднення повітря в Україні – погляд з космосу. Прага–Київ. 2020. 38 с. URL: <https://cleanair.org.ua/wp->

content/uploads/2020/11/cleanair.org.ua-ukraine-space-ua-final-web.pdf

(дата

звернення: 27.05.2026).

20. Савенець М. В., Дворецька І. В., Надточій Л. М. Сучасний стан забруднення атмосферного повітря в Україні за даними супутника Sentinel-5P. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2019. № 51. С. 221–233. URL: <https://journals.uran.ua/geoeco/article/view/204913/204805> (дата звернення: 28.05.2026).

21. Савенець М. В., Дворецька І. В., Козленко Т. В., Комісар К. М., Уманець А. П., Жемера Н. С. Стан забруднення атмосферного повітря в Україні напередодні повномасштабного російського вторгнення. Частина 1: Приземний вміст забруднюючих речовин. *Ukrainian hydrometeorological journal*. 2023. № 31. С. 69-87. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/d1a5/8ccd46d949f9c5b30b3a609f4cfd11c5a178.pdf> (дата звернення: 28.05.2026).

22. Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря України (1990-2024). Статистичні дані. Державна служба статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/ns/ns_rik/vzr_apU_90_20_ue.xlsx (дата звернення: 25.05.2026).

23. Викиди забруднюючих речовин та діоксиду вуглецю в атмосферне повітря (1990-2024). Статистичні дані. Державна служба статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2020/ns/ns_rik/vzr_dv_90_20_ue.xlsx (дата звернення: 25.05.2026).

24. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферне повітря від стаціонарних джерел забруднення. Статистичні дані. Державна служба статистики України. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzrap_u.htm (дата звернення: 25.05.2026).

25. Узагальнена інформація про якість атмосферного повітря в населених пунктах за даними мережі спостережень гідрометеорологічних організацій.

URL: <https://data.gov.ua/dataset/3eda331d-d4ec-4e7f-b11b-f21fe1f56239> (дата звернення: 25.05.2026).

26. Войцицький В. М., Хижняк С. В., Данчук В. В., Мідик С. В., Грищук І. А., Ушкалов В. О. Екологічні ризики: природа і критерії. *Екологічні науки*. 2020. № 4(31). С. 131–135.

URL: <https://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2020/4/23.pdf> (дата звернення: 28.05.2026).

27. Чурилін В., Віткін Л. Сучасний погляд на поняття екологічного ризику: концептуальна основа. Вчені записки Університету «КРОК». 2024. № 2(74). С. 198–203. URL: <https://snku.krok.edu.ua/index.php/vcheni-zapiski-universitetu-krok/article/view/728/744> (дата звернення: 29.05.2026).

28. Ukraine – Subnational Administrative boundaries. URL: <https://data.humdata.org/dataset/geoboundaries-admin-boundaries-for-ukraine> (дата звернення: 30.05.2026).

29. Зацерковний В. І., Бурачек В. Г., Железняк О. О., Терещенко А. Геоінформаційні системи і бази даних: монографія. Кн. 2. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. 237 с. URL: <https://er.nau.edu.ua/bitstream/NAU/28039/1/%D0%97%D0%B0%D1%86%D0%B5%D1%80%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D1%82%D0%B0%20%D1%96%D0%BD.%20%27%27%D0%93%D0%B5%D0%BE%D1%96%D0%BD%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%86%D1%96%D0%B9%D0%BD%D1%96%20%D1%81%D0%B8%D1%81%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%B8%20%D1%96%20%D0%B1%D0%B0%D0%B7%D0%B8%20%D0%B4%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%85.%20%D0%9A%D0%BD.%20%27%27.pdf> (дата звернення: 29.05.2026).

30. Вольчин І. А., Гапонич Л. С., Згоран І. П. Вибір технології десульфуризації димових газів для українських вугільних теплових електростанцій. *Наукові праці НУХТ*. 2018. Том 24, № 4. С. 154–168. URL: <https://nuft.edu.ua/doi/doc/swnuft/2018/4/18.pdf> (дата звернення: 01.06.2026).

31. ГКД 34.02.305-2002 Викиди забруднювальних речовин в атмосферу

від енергетичних установок. Методика визначення. [Чинний від 2002-07-01]. Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2002. 43 с.

32. Енергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики в сучасному світі. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-3/section-2/2-3> (дата звернення: 01.06.2026).

33. Пиш'єв С. В. Оксидаційна десульфуризація високосіркового низькометаморфізованого вугілля: дис...канд. техн. наук: 05.17.07 / Державний університет «Львівська політехніка». Львів, 1999. 182 с. URL: <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0499U001975> (дата звернення: 02.06.2026).

34. Шаройко Н. А., Каграманян А. О., Полтавський І. П., Савенко В. В. Захист навколишнього середовища при роботі теплотехнологічного устаткування: навч. посіб. Харків: УкрДАЗТ, 2011. 395 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/2342/1/%D0%9D%D0%B0%D0%B2%D1%87%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B8%D0%B9%20%D0%BF%D0%BE%D1%81%D1%96%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D0%BA.pdf> (дата звернення: 02.06.2026).

35. Microbial Strategies for Coal Desulfurization. Nature index. Springer Nature. URL: <https://www.nature.com/nature-index/topics/l4/microbial-strategies-for-coal-desulfurization> (дата звернення: 02.06.2026).

36. Корчевой Ю. П., Півняк Г. Г. Новітні технології використання вугілля в енергетиці. Наука і інновації. 2006. Т.2 № 2. С. 53–62. URL: <https://nasplib.isoftware.kiev.ua/server/api/core/bitstreams/5f8e2677-008a-499d-a85d-a45f8ff8244a/content> (дата звернення: 02.06.2026).

37. Юрченко М. М. та ін. Аналіз можливості заміщення природного газу на ТЕЦ України шляхом впровадження чистих технологій спалювання вугілля (на прикладі Херсонської ТЕЦ). URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/1f3b4188-db44-4ecc-b0a8-2f18bd9823ff/content> (дата звернення: 03.06.2026).

38. Горяной С. В., Вольчин І. А. Застосування технологій очищення димових газів для твердопаливних котлів теплоелектроцентралей. *Проблеми*

машинобудування. 2025. Т. 28. № 1. 16 с. URL: <https://doi.org/10.15407/pmach2025.01.055> (дата звернення: 03.06.2026).

39. Манідіна Є. А. Хімічні методи очистки газів та стічних вод: навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА спеціальністю 183.00.01 «Технології захисту навколишнього середовища». Запоріжжя: ЗДІА, 2017. 128 с URL: https://moodle.znu.edu.ua/pluginfile.php/660726/mod_resource/content/1/%D0%9D%D0%9C%D0%9F.%20%D0%A5%D0%9C%D0%9E%D0%932017%281%29.pdf (дата звернення: 17.05.26).

40. Gan Cheng, Chuanxiang Zhang. Desulfurization and Denitrification Technologies of Coal-fired Flue Gas. *Pol. J. Environ. Stud.* 2018. Vol. 27, No. 2. P. 481-489. URL: <https://www.pjoes.com/pdf-75959-24269?filename=Desulfurization-and-Denit.pdf> (дата звернення: 02.06.2026).

41. Шапорєв В. П. та ін. Екологія у виробництві тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів: навч. посіб. Харків: Технологічний центр, 2018. 180 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/1cc8ffbf-e1e2-41ec-ae81-9eabf7e051ed/content> (дата звернення: 02.06.2026).

42. Шелешей Т. В., Беднарська І. С., Майєр Л., П'ятачук В. С. Перспективи використання сіркоочисних установок на великих енергетичних об'єктах. Молодий вчений, 2000. № 4(80) С. 240–243. URL: <https://molodyivchenyi.ua/index.php/journal/article/view/1917/1892> (дата звернення: 01.06.2026)

43. Дзевочко О. М., Подустов М. О., Дзевочко А. І. Аналіз методів очищення відхідних газів від двооксиду сірки. *Інтегровані технології та енергозбереження.* 2023. № 3. С.13–23. URL: <https://ite.khpi.edu.ua/article/view/292408/285461> (дата звернення: 02.06.2026).

44. Miller B. G. Clean Coal Engineering Technology. Elsevier, 2017.

45. Юрасова О. Г. Дослідження екологічних показників роботи котла ТПП–210А при різних системах пилоподачі. *Technology audit and production reserves.* 2014. № 6/5(20). С. 39–42. URL: <https://journals.urau.ru/tarp/article/download/31786/30473> (дата звернення:

05.06.2026).

46. Зміївська ТЕС: історія, потужність і трагедія енергетичного гіганта. URL: <https://ns-plus.com.ua/zmiyivska-tes-istoriya-potuzhnist-i-tragediya-energetychnogo-giganta/> (дата звернення: 02.06.2026).

47 Мисак Й. С., Кравець Т. Ю., Мисак С. Й., Шатило Д. Д., Якимов Є. М. Переведення пиловугільних котлів ТПП–210А Трипільської ТЕС на спалювання твердого палива з технічними характеристиками, відмінними від проектних. *Енерготехнології та енергозбереження*. 2017. № 4. С. 4–8. URL: <https://www.etars-journal.org/index.php/journal/article/download/97/159> (дата звернення: 05.06.2026).

48. Дунаєвська Н. І., Нехамін М. М., Бондзик Д. Л. Технологія зниження викидів оксидів азоту при факельному спалюванні вугілля. *Nauka innov.* 2016. № 12(6). С. 49–56. URL: <http://scinn.org.ua/sites/default/files/pdf/2016/N6/Dunaevska.pdf> (дата звернення: 02.06.2026).

49. Бекетов В. Є., Ломакіна О. С. Методичні рекомендації до виконання курсової роботи «Джерела та процеси забруднення атмосфери» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 101 – Екологія) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. 42 с. URL: <https://eprints.kname.edu.ua/66481/> (дата звернення: 25.05.2026).

50. Файнзільберг Л. С., Жуковська О. А., Якимчук В. С. Теорія прийняття рішень: підручник для студентів спеціальності «Комп'ютерні науки та інформаційні технології», спеціалізації «Інформаційні технології в біології та медицині». Київ: Освіта України, 2018. 246 с. URL: https://fainzilberg.irtc.org.ua/files/UCHEBNIK_TPR.pdf (дата звернення: 01.06.2026).

51. Котельникова Ю., Касьмін Д. Метод аналізу ієрархій в прийнятті рішень щодо кадрового забезпечення сільськогосподарських підприємств. *Економіка та суспільство*. 2020. № 22. 11 с. URL:

<https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/76> (дата звернення: 01.06.2026).

52. Синенко М. А. Метод Сааті при прийнятті управлінських рішень на прикладі підприємства малого бізнесу. Інтелект XXI. 2018. № 1. С. 235–238. URL: https://intellect21.nuft.org.ua/journal/2018/2018_1/51.pdf (дата звернення: 01.06.2026).

53. Ізмайлова О.В. Системний аналіз[Електронний ресурс]: методичні вказівки до виконання циклу практичних робіт «Метод аналізу ієрархій». Київ: КНУБА, 2024. 28 с. URL: <https://repository.knuba.edu.ua/server/api/core/bitstreams/a1868c93-8fa7-4eb0-baf5-ff8a67bfbaf1/content> (дата звернення: 01.06.2026).

54. Телюра Н. О., Плясуля С. В., Крупицька Д. А., Вірченко В. І. Системи підтримки прийняття рішень в проєктуванні інноваційних технологій захисту довкілля. Комунальне господарство міст. 2023. Том 4 № 178. С. 27–32. URL: <https://khg.kname.edu.ua/index.php/khg/uk/article/view/6150> (дата звернення: 01.06.2026).

55. Податковий Кодекс України: Закон України від 01.12.2010 р. № 2755-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2755-17#n5958> (дата звернення: 02.06.2026).