УДК 662.613+628.512

Боднар Л. А.
Заворотний В.І.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

В роботі проаналізовано ефективність різних методів десульфуризації димових газів. Проаналізовано ефективність таких заходів: застосування мокрого очищення у скрубері з використанням вапняка; процес Вальтера; процем Веллмана – Лорда; сухе очищення димових газів методом інжекції сухого сорбенту.

Ключові слова: *вугілля; оксиди сірки; процес Вальтера; сухий сорбент; десульфуризація.*

Abstract

The paper analyzes the effectiveness of various flue gas desulfurization methods. The effectiveness of the following measures is analyzed: the use of wet cleaning in a scrubber using limestone; the Walter process; the Wellman-Lord process; dry flue gas cleaning using the dry sorbent injection method.

Keywords: *coal; sulfur oxides; Walter process; dry sorbent; desulfurization.*

Вступ

У 2024 році світовий попит на вугілля зріс на 1,5% порівняно з 2023 роком, досягнувши нового історичного максимуму в 8,79 млрд тонн. Це свідчить про продовження тенденції до зростання споживання вугілля, хоча й повільнішими темпами, ніж темпи зростання на 4,4% у 2022 році та 2,3% у 2023 році. [1]. Збільшення у 2024 році було зумовлене переважно країнами, що розвиваються, в Азії, зокрема Китаєм та Індією. Натомість, попит на вугілля значно знизився в розвинених економіках, зокрема в Європейському Союзі (зменшення на 40 млн тонн, або 11%) та Сполучених Штатах (зменшення на 14 млн тонн, або 4%), значною мірою через скорочення виробництва електроенергії з вугілля.

Україна взяла курс на декарбонізацію теплової генерації. У перспективі вітчизняні ТЕС повинні відмовитися від вугілля і перейти на інші види палива. Зокрема, йдеться про природний газ, біометан та біопаливо. Такі зобов'язання Україна взяла на себе ще у 2021 році на Кліматичній конференції у Великій Британії [2]. За даними [3] Україна взяла на себе зобов’язання відмовитися від вугілля до 2035 року, а ДТЕК – до 2040 року. Також зазначається [3], що «ці цілі поки що не закріплені урядом України на національному рівні, а також не були обговорені всередині країни». Тому попереду – важливий шлях їхнього узгодження із врахуванням потреби у справедливій трансформації вугільних громад та регіонів [3].

Внаслідок вторгнення РФ Україна втратила значні потужності відновлюваних джерел енергії – 80% ВЕС та 20% СЕС [2]. Крім того, українські ТЕС зазнали пошкоджень. У зв’язку з війною, невідомо чи вдасться найближчим часом повністю відмовитися від вугілля.

Під час спалювання вугілля, з димовими газами в навколишнє середовище викидається значна кількість різних забруднювальних речовин, в тому числі оксиди сірки [4]. .

Слід зазначити, що в Україні навіть на великих енергетичних об’єктах сіркоочисні установки не використовуються.

Мета роботи – дослідження ефективності технологій десульфуризації димових газів.

Основна частина

Для складання державної та галузевої звітності, а також для прогнозного оцінювання обсягів викидів забруднювальних речовин, в Україні використовується галузевий керівний документ [5].

Для розрахунку показника емісії оксидів азоту k_{SO2}, г/ГДж, з урахуванням заходів скорочення викиду використовується формула [5]

$$k_{SO_2} = \frac{10^6}{Q_н^p}\frac{2\cdot S^p}{100}\left(1-\eta_I\right)\left(1-\eta_{II}\beta\right), \qquad (1)$$

де $Q_н^p$ – нижча теплота згорання палива, МДж/кг;

S^p– вміст сірки в паливі, %;

η_I – ефективність звязування сірки золою або сорбентом у енергетичній установці;

η_{II} – ефективність очищення димових газів від оксидів сірки;

β– коефіцієнт роботи сіркоочисної установки.

Ефективність звязування сірки золою або сорбентом у енергетичній установці залежить від технології спалювання та хімічного складу палива, яке спалюється, і типу сорбенту. Під час спалювання твердого палива, до мінеральної складової якого входять сполуки лужних та лужноземельних металів, відбувається часткове звязування сірки з утворенням сульфатів або сульфітів. Для факельного спалювання вугілля з твердим шлакковидаленням $\eta_I=0,05$.

Димові гази можуть бути очищені від оксидів сірки в сіркоочисних установках шляхом застосування технологій десульфуризації димових газів з різною ефективністю очищення, що в розрахунках враховується коефіцієнтом η_{II}

Мокре очищення у скрубері з використанням вапняку (вапна) або доломіту з одержанням гіпсу – це найпоширеніша у світі технологія десульфуризації **(**WFGD – Wet Flue Gas Desulfurization**).** Вона базується на хімічній реакції між кислим газом та лужною суспензією карбонатів кальцію або магнію [6].

Процес Вальтера (Walther Process) – технологія мокрого очищення димових газів, яка, на відміну від вапнякового методу, використовує аміак NH_3 як реагент. На виході отримується не гіпс, а високоефективне мінеральне добриво – сульфат амонію [7].

Процес Веллмана-Лорда (Wellman-Lord) – це класична технологія регенеративного мокрого очищення димових газів від SO_2 На відміну від вапнякового методу, де побічним продуктом є гіпс CaSO4, цей метод дозволяє повертати реагент у цикл і отримувати чисту сірку або сірчану кислоту [8, 9].

Сухе очищення димових газів методом інжекції сухого сорбенту (Dry Sorbent Injection — DSI) є однією з найбільш економічно вигідних та гнучких технологій для зниження викидів діоксиду сірки. Технологія базується на вприскуванні тонкоподрібненого сухого реагенту безпосередньо в потік гарячих димових газів. Сорбент вступає в хімічну реакцію з оксидами сірки, утворюючи тверді солі, які згодом вловлюються пилоочисним обладнанням [10].

Орієнтовні значення ефективності різних технологій десульфуризації димових газів наведено в таблиці Д.3 [6].

Для енергетичної установки, що за звітний період спожила 100 тис. тон вугілля проаналізовано вплив технологій десульфуризації на зменшення викидів оксидів сірки.

На рисунку 1 наведено отримані результати.

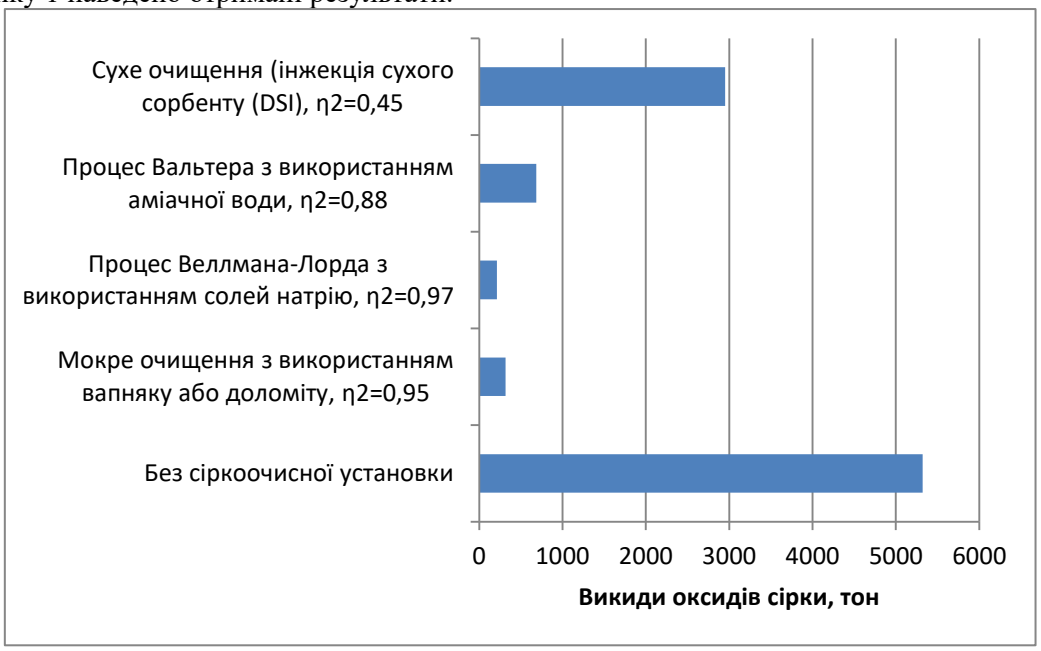


Рисунок 1 – Валові викиди оксидів сірки

Елементний склад вугілля: C^p=49,8%, H^p=3,3%, O^p=6,2%, N^p=0,9%, S^p=2,8%, A^p=27%, W^p=10%.

Отримані дані свідчать про ефективність технологій десульфуризації. Залежно від заходу по скороченню викидів оксидів сірки, зменшення викидів становить 44,5…96 %. Викиди оксидів сірки

зменшились з 5320 тон до 2950 тон. Найефективнішим методом десульфуризації є процес Веллмана-Лорда. Для даного методу зменшення викидів оксидів сірки становить з 5320 тон до 211 тон.

Сучасні технології десульфуризації, що здатні забезпечити ступінь очищення не менше ніж 96%, поки не знайшли поширення на ТЕС України через їх високу вартість та відсутність промислового досвіду [11]. Однак за кордоном технології десульфуризації димових газів набули широкого застосування і успішно використовуються.

ВИСНОВКИ

Проаналізовано літературну інформацію по методах зменшення викидів оксидів сірки. В роботі досліджено ефективність таких заходів: застосування мокрого очищення у скрубері з використанням вапняка; процес Вальтера; процес Веллмана – Лорда; сухе очищення димових газів методом інжекції сухого сорбенту. Отримані в роботі результати свідчать про ефективність даних заходів по скороченню викидів оксидів сірки. Залежно від заходу по скороченню викидів оксидів сірки, зменшення викидів становить 44,5…96 %. %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Coal Industry 2026. URL: https://www.iea.org/reports/coal-mid-year-update-2025/demand (дата звернення 04.03.2026 р.)
2. Декарбонізація енергетики: чи виконає Україна міжнародні зобов'язання? URL: https://ua-energy.org/uk/posts/dekarbonizatsiia-enerhetyky-chy-vykonaie-ukraina-mizhnarodni-zoboviazannia (дата звернення 04.03.2026 р.)
3. Прогрес, але навряд успіх. 5 ключових висновків з Міжнародних кліматичних переговорів у Ґлазґо. URL: https://ecoaction.org.ua/5-vysnovkiv-z-glazgo2021.html . (дата звернення 04.03.2026 р.)
4. Ткаченко С. Й., Боднар Л. А. Екологічні аспекти виробництва енергії. Вінниця: ВНТУ, 2017. 83 с.
5. ГКД 34.02.305–2002. Викиди забруднювальних речовин у атмосферу від енергетичних установок. Методика визначення. 40 с.
6. Wet-Limestone Scrubbing Fundamentals. URL: https://www.power-eng.com/operations-maintenance/wet-limestone-scrubbing-fundamentals/ (дата звернення 04.03.2026 р.)
7. Energy saving flue gas desulphurization process. URL:https://cordis.europa.eu/project/id/EE.-00118-79/fr (дата звернення 04.03.2026 р.)
8. The Wellman Lord Process. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-3624-2_7 (дата звернення 04.03.2026 р.)
9. Кощеєв М.А., Манзенко С.В., Сігарьов Є.М. та ін. Технологія очистки сірковмісних димових газів з отриманням на виході товарної продукції. №2. 2025 р. С.59-66.
10. Dry Sorbent Injection for SO2/HCl Control Cost Development Methodology. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-05/documents/attachment_5-5_dsi_cost_development_methodology.pdf (дата звернення 04.03.2026 р.)
11. Вольчин І. А., Гапонич Л. С., Згоран І. П. Вибір технології десульфуризації димових газів для українських вугільних теплових електростанцій. Наукові праці НУХТ. №4. 2018. С.154-168.

Боднар Лілія Анатоліївна, к.т.н., доцент кафедри теплоенергетики ВНТУ. e-mail: Bodnar06@ukr.net
Заворотний Вадим Ігорович, студент гр. ТЕ-24 мсб, ФБЦЕІ, vadim06032000@icloud.com

Bodnar Lilia, Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of power engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: Bodnar06@ukr.net.
Zavorotnyi Vadym , student, vadim06032000@icloud.com