

# Екологічна безпека в контексті шкідливих чинників промислових викидів як умова гігієни праці і безпеки життєдіяльності людини

## Environmental safety in the context of harmful factors of industrial emissions as a condition of occupational hygiene and human life safety

**Сергій Семірягін<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** к.т.н., доцент, заступник генерального директора, e-mail: td.destal@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8733-3216

**Артем Петрищев<sup>B</sup>**

к.т.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: kafedrales@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2631-1723

**Микола Журавель<sup>B</sup>**

старший викладач кафедри, e-mail: diplom.opins@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4790-9911

**Сергій Журавель<sup>B</sup>**

старший викладач кафедри, e-mail: zhuravelsegry87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0797-2350

**Микола Лазуткін<sup>B</sup>**

к.т.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: ni\_1646lz@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2926-7986

**Богдан Цимбал<sup>C D</sup>**

к.т.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: tsembalbogdan@ukr.net, bohdan.tsymbal@mipolytech.education, ORCID: 0000-0002-2317-3428

**Sergiy Semyriahyn<sup>A</sup>**

**Corresponding author:** Candidate of Technology Sciences, Associated Professor, e-mail: td.destal@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8733-3216

**Artem Petryshchev<sup>B</sup>**

Candidate of Technology Sciences, Associated Professor, e-mail: kafedrales@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2631-1723

**Mykola Zhuravel<sup>B</sup>**

Senior Lecturer of Department, e-mail: diplom.opins@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4790-9911

**Serhii Zhuravel<sup>B</sup>**

Senior Lecturer of Department, e-mail: zhuravelsegry87@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0797-2350

**Mykola Lazutkin<sup>B</sup>**

Candidate of Technology Sciences, Associated Professor, e-mail: ni\_1646lz@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2926-7986

**Bohdan Tsymbal<sup>C D</sup>**

Candidate of Technology Sciences, Associated Professor, Associate Professor of the Department e-mail: tsembalbogdan@ukr.net, bohdan.tsymbal@mipolytech.education, ORCID: 0000-0002-2317-3428

<sup>A</sup> ТОВ НВП «Дніпроенергосталь», м. Запоріжжя, Україна

<sup>B</sup> Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

<sup>C</sup> Національний університет цивільного захисту України, м. Харків, Україна

<sup>D</sup> Товариство з обмеженою відповідальністю «Технічний університет «Метінвест політехніка», м. Запоріжжя, Україна

<sup>A</sup> LTD Scientific and Manufacturing Enterprise Dneproenergostal, Zaporizhzhia, Ukraine

<sup>B</sup> National University "Zaporizhzhya Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine

<sup>C</sup> National University of Civil Defence of Ukraine, Kharkov, Ukraine

<sup>D</sup> Limited liability company "Technical university "METINVEST POLYTECHNIC", Zaporizhzhia, Ukraine

Received: September 13, 2023 | Revised: October 24, 2023 | Accepted: October 31, 2023

DOI: 10.33445/sds.2023.13.5.18

**Мета роботи:** попередження ускладнень при дотриманні гігієни праці робітників промислових підприємств та зниження шкідливого впливу на мешканців прилеглих територій промислових димових газів завдяки графічному представленню, систематизації та аналізу впливу технологічних параметрів на показники сіркоочищення газоподібних викидів.

**Метод:** аналітичний метод та математичне моделювання.

**Результати дослідження:** завдяки промисловим даним графічно виражено подвійні залежності ступеню сіркоочищення димових газів від температурних умов процесу, об'єму газу, що поступає на очищення, та об'єму газу, що поступає на рециркуляцію. Побудовано відповідні лінійні математичні моделі. Це дає можливість оптимізувати технологічні показники із подальшим регулюванням процесу сіркоочищення щодо підвищення його ефективності. Досягнення зниження забруднення димових газів діоксидом сірки сприяє запобіганню ускладнень при дотриманні гігієни праці робітників металургійних підприємств зменшенню шкідливого впливу на здоров'я населення регіонів, наближених до виробничої зони.

**Purpose:** prevention of complications in compliance with the occupational hygiene of workers of industrial enterprises and reduction of the harmful effects of industrial flue gases on the inhabitants of the adjacent territories thanks to the graphic presentation, systematization and analysis of the influence of technological parameters on the indicators of desulfurization of gaseous emissions.

**Method:** analytical method and mathematical modeling.

**Findings:** thanks to industrial data, double dependences of the degree of desulfurization of flue gases on the temperature conditions of the process, the volume of gas entering for cleaning, and the volume of gas entering for recirculation are graphically expressed. Corresponding linear mathematical models were built. This makes it possible to optimize technological indicators with further regulation of the desulfurization process to increase its efficiency. Achieving a reduction in the pollution of flue gases by sulfur dioxide contributes to the prevention of complications in the observance of occupational hygiene of workers of metallurgical enterprises, to the reduction of harmful effects on the health of the population of the regions close to the production area.

**Теоретична цінність дослідження:** побудовано математичні моделі подвійних залежностей ступеня сіркоочищення від технологічних параметрів процесу фільтрації димових газів в промислових умовах. Отримані результати представлено у вигляді рівнянь. Для більшої показовості побудовано подвійні графіки із нанесенням точок промислових показників та лінії отриманої моделі.

**Практична цінність дослідження:** на основі промислових даних визначено подвійні залежності, що дозволяє досягати певних значень ступеня сіркоочищення димових газів при регулюванні технологічних параметрів десульфурації із встановленням найбільш раціональних показників. Отримані результати можуть бути використані у оптимізації виробничого процесу промислових підприємств, діяльність яких супроводжується газоподібними викидами із вмістом сірки.

**Тип статті:** розрахунково-практичний та аналітичний.

**Theoretical implications:** mathematical models of double dependences of the degree of desulfurization on the technological parameters of the flue gas filtration process in industrial conditions were built. The obtained results are presented in the form of equations. For greater visibility, double graphs were constructed with the plotting of points of industrial indicators and the line of the obtained model.

**Practical implications:** on the basis of industrial data, double dependences are determined, which allows to achieve certain values of the degree of desulfurization of flue gases when adjusting the technological parameters of desulfurization with the establishment of the most rational indicators. The obtained results can be used in the optimization of the production process of industrial enterprises, the activity of which is accompanied by gaseous emissions with sulfur content.

**Papertype:** calculation-practical and analytical.

**Ключові слова:** десульфурація, математичне моделювання, безпека, праця.

**Key words:** desulfurization, mathematical modeling, safety, work.

## 1. Вступ

Слід зазначити, що світова потреба в енергії, зокрема в електроенергії, постійно зростає. При цьому, в даний час, основним джерелом енергії у світі є викопне паливо. Тому необхідно враховувати, що його спалювання, особливо на теплових електростанціях, призводить до утворення таких продуктів, як  $SO_x$  ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ),  $NO_x$  ( $NO$ ,  $NO_2$ ,  $N_2O$ ), незгорілих вуглеводнів, летючої золи та сажі. Також необхідно враховувати, що деякі з них є токсичними, наприклад  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $C_mH_n$ ,  $CO$  та летюча зола. Найбільш значущим оксидом сірки, що утворюється при спалюванні та викидається в атмосферу, є діоксид сірки. В результаті змішування продуктів горіння з вологою в повітрі, утворюються кислотні дощі, які негативно впливають на екосистему. Через постійно зростаючі викиди газів в атмосферу і як наслідок підвищення суворості норм щодо забруднення повітря, у всьому світі докладаються зусилля для зменшення викидів  $SO_2$  [1].

Багато енергетичних, хімічних та інших підприємств в якості основного палива широко використовують вугілля. На жаль, дуже часто фіксуються випадки, що в результаті технічних або управлінських недоліків велика кількість вугілля безпосередньо спалюється без попередньої обробки, що є причиною утворення великої кількості промислових димових газів, що містять  $SO_2$ . А це призводить до забруднення навколишнього середовища, а як наслідок до таких надзвичайних ситуацій, як кислотні дощі. Також необхідно враховувати, що потрапляння такого диму в дихальні шляхи людини негативно впливає на функціонування його серцево-легеневої системи. Тобто, з точки зору захисту як довкілля, так і здоров'я людини, концентрацію  $SO_2$  в димових газах необхідно постійно контролювати [2].

Тому, в даний час, проблема раціоналізації параметрів сіркоочищення на промислових підприємствах з визначенням практично можливих шляхів підвищення рівня видалення діоксиду сірки з димових газів є актуальною. Реалізація останнього підвищить екологічну безпеку довкілля, знизить професійні ризики шкідливого впливу на здоров'я працівників промислових підприємств, тобто значно підвищить безпеку життя та діяльності населення України.

## 2. Теоретичні основи дослідження

В Україні, найбільшим джерелом забруднення довкілля  $SO_2$  є великі спалювальні установки (теплоелектроцентралі, теплоелектростанції, котельні), номінальна теплова потужність яких становить 50 МВт і більше.

На жаль Україна не встигла імплементувати та виконати умови Директиви 2001/80/ЄС про обмеження викидів деяких забруднюючих речовин у повітря, на зміну цій директиві ухвалили

Директиву 2010/75/ЄС про промислові викиди (інтегрований підхід до запобігання забрудненню та його контролю). Це пов'язано з багатьма чинниками і, зокрема, з фінансовою складовою.

У провідних європейських країнах не менше 20 % становлять витрати на екологічні заходи. В Україні ж лише паливо становить 85-90% вартості електроенергії, тому на забезпечення екологічної безпеки залишається відносно невелика частка.

Порівнюючи фактичні концентрації забруднюючих речовин лише на тепло-електростанціях України з вимогами Директиви 2010/75/ЄС щодо промислових викидів, отримуємо гнітючий результат, в Україні викиди діоксиду сірки та оксиду азоту перевищують встановлені норми у 10–30 разів.

Відповідно до [3] створений перелік забруднюючих речовин, щодо яких здійснюється оцінювання, а також визначаються пороги оцінки, граничні значення та інші рівні забруднюючих речовин, за якими проводиться оцінка якості атмосферного повітря. Також зазначаються обов'язкові до моніторингу шкідливі речовини, до яких належать: діоксид сірки –  $\text{SO}_2$ ; діоксид азоту –  $\text{NO}_2$  та  $\text{NO}$ ; бензол –  $\text{C}_6\text{H}_6$ ; оксид вуглецю –  $\text{CO}$ ; свинець –  $\text{Pb}$ .

Додаткове, спеціальне законодавство транспонується у кілька підзаконних актів. Зокрема, в частині, що стосується якості атмосферного повітря, найважливішим підзаконним актом є "Порядок здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря", який містить більшість положень Директиви 2008/50/ЄС про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи. Він визначає зони та агломерації моніторингу якості повітря, забруднюючі речовини, що підлягають моніторингу, пороги оцінки і граничні значення. При цьому граничні значення якості атмосферного повітря відповідають вимогам Директиви 2008/50/ЄС.

Законодавством України [4] встановлені граничні значення для забруднюючих речовин, так для діоксиду сірки це період усереднення:

- 1 година:  $350 \text{ мкг/м}^3$ , не повинен бути перевищений більше, ніж в 24 рази на календарний рік;

- 24 години:  $125 \text{ мкг/м}^3$ , не повинен бути перевищений більш ніж в 3 рази за календарний рік.

На даний час в Україні фактичні обсяги викидів забруднюючих речовин значно перевищують норми, встановлені Директивою 2010/75/EU. Зокрема,  $\text{SO}_x$  – 24 рази;  $\text{NO}_x$  – 6 разів; пилу – 40 разів.

Останніми роками забруднення димовими газами привертає все більше уваги, тому існує багато відповідних досліджень технології видалення  $\text{SO}_2$ . Ряд технологій були використані для контролю викидів  $\text{SO}_2$ , таких як мокра десульфурація димових газів, циркуляційний киплячий шар і десульфурація шламу. Підвищення ефективності видалення та досягнення спільного контролю багатьох забруднюючих речовин із середньою та низькою концентрацією стали центром досліджень останнього часу [5].

Десульфурація димових газів, яка використовує карбонат кальцію ( $\text{CaCO}_3$ ), забезпечує ефективне видалення  $\text{SO}_2$ , що викидається в атмосферу з електростанцій, а також значно підвищує ефективність видалення та надійність цього процесу, при цьому його вартість значно знижується. Процес видалення  $\text{SO}_2$  з димового газу можна розділити на два типи скрубєрів, а саме сухий скрубєр і вологий скрубєр. Сухий скрубєр – це установка десульфурації, в якій абсорбент  $\text{SO}_2$  впорскується в камеру згоряння на значній потужності для поглинання оксидів сірки. Цей скрубєр може працювати з низькою вартістю обладнання та низьким споживанням енергії, але має низьку ефективність десульфурації через меншу швидкість відгуку, ніж мокрий скрубєр. З іншого боку, мокрий скрубєр є найбільш часто використовуваним процесом видалення  $\text{SO}_2$ , основним процесом із 87 % загальної глобальної потужності. Мокрий скрубєр відносно легко адаптувати до звичайних установок, які вже працюють, а експлуатаційні витрати обумовлюються низькою ціною вапняку. Традиційний процес видалення  $\text{SO}_2$

використовує мокрий скруббер у "одноразовому процесі", який вимагає постійної подачі нових адсорбентів для підтримки безперервної роботи [6].

Авторами роботи [7] зазначалося, що найпоширенішим методом сіркоочищення є десульфурація димових газів. Регенеративний метод десульфурації димових газів має переваги перед іншими методами завдяки високій ефективності десульфурації, регенерації сорбенту та зменшенню обсягу переробки відходів. Присутність окрім SO<sub>2</sub> інших газів у димовому газі, наприклад O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> і водяної пари, а також температура реакції критично впливають на сорбційну здатність і регенерацію сорбенту. Для отримання оптимальної ефективності видалення SO<sub>2</sub> інші параметри, такі як рН, концентрація SO<sub>2</sub> на вході та добавки, повинні відповідним чином регулюватися.

Із вищевказаного витікає, що дослідження щодо визначення впливу технологічних параметрів сіркоочищення димових газів на ступінь зниження вмісту діоксиду сірки з метою підвищення ефективності процесу фільтрації є доцільним. Забезпечення зниження забруднення димових газів діоксидом сірки буде сприяти запобіганню професійних ризиків та зменшенню шкідливого впливу на здоров'я працівників, а також підвищенню рівня екологічної безпеки.

### **3. Постановка проблеми**

Виявлено, що існують складнощі стосовно оптимізації технологічних показників фільтрації димових газів від сірки на промисловому виробництві. Існують проблеми небезпеки від токсичної дії оксидів сірки, які потрапляють в дихальні шляхи людини. Це вказує на потребу виявлення взаємозалежності ступеня сіркоочищення димових газів від технологічних факторів виробництва із пошуком шляхів регулювання параметрів процесу у бік зростання ефективності. Здобуття результатів у вказаному напрямку може обумовити запобігання професійних ризиків та зменшення негативного впливу на здоров'я працівників шкідливих факторів виробництва, а також покращення показників екологічної безпеки.

### **4. Методологія дослідження**

Досліджувані фактори було взято із раніше опублікованої роботи [8], в якій було представлено результати вимірів процесу сіркоочищення на металургійному підприємстві. На основі цих даних здійснили графічне представлення подвійних залежностей ступеню сіркоочищення від окремих технологічних параметрів у вигляді точкових графіків (рис. 1). Разом із точками вимірів на графіки було нанесено відповідні побудовані математичні моделі у вигляді лінійних функцій.

Апроксимацію графіків проводили методом найменших квадратів. В якості рівняння регресії було обрано модель:

$$\hat{y} = ax + b \quad (1)$$

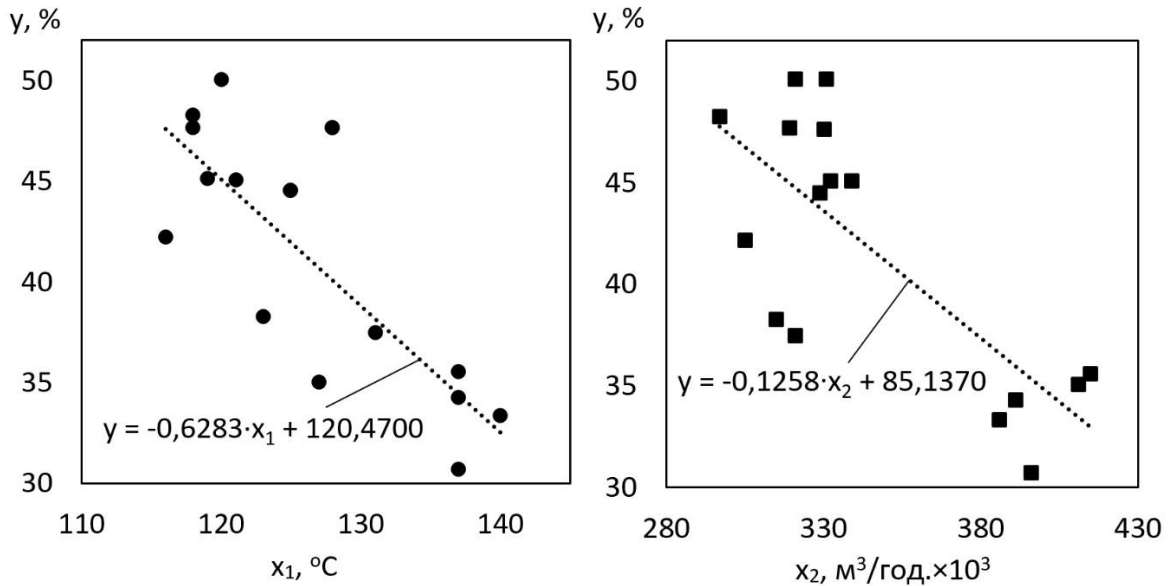
де  $\hat{y}$  – ступінь сіркоочищення, %;  
 $x$  – один із технологічних параметрів;  
 $a$  та  $b$  – коефіцієнти регресій для кожного графіку відповідно.

### **5. Результати**

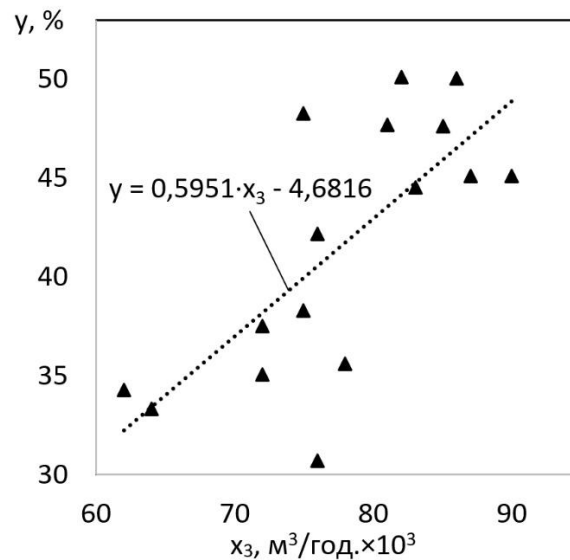
Виконано дослідження взаємозв'язок процесів і побудовано функціональну залежність, що дозволило з деякою вірогідністю використовувати її в плануванні очікуваних технологічних показників. Ступінь сіркоочищення димових газів залежить від багатьох факторів. В цій роботі для аналізу було обрано подвійні залежності впливу на ступінь сіркоочищення таких

параметрів, як температурні умови процесу та об'єми газу, що опрацьовує адсорбер (рис. 1).

Побудова графіків дала можливість візуально прослідкувати, що досягнення більшого ступеня сіркоочищення (на рівні 48...50 %) забезпечується при відносно низьких температурах процесу (на рівні 118...120 °С). Підвищення температури до 137...140 °С призводить до зниження ступеня сіркоочищення до 30...33 % (рис. 1, а).



а, б



в

Рисунок 1 – Залежність ступеня сіркоочищення димових газів (y, %) від деяких технологічних параметрів з наведенням відповідних лінійних функцій при апроксимації даних: а – температура перед адсорбером, (x<sub>1</sub> °С), б – об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, (x<sub>2</sub>, м<sup>3</sup>/год. × 10<sup>3</sup>), в – об'єм газу, що поступає на рециркуляцію (x<sub>3</sub>, м<sup>3</sup>/год. × 10<sup>3</sup>).

Використовували результати вимірів, що були представлені в числовому вираженні в табличній формі в роботі [8]

Якщо аналізувати вплив на ефективність сіркоочищення об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, то можна зазначити також зворотньопропорційний характер залежності. Видно, що найбільший ступінь сіркоочищення (на рівні 37...50 %) досягається при

об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, на рівні 297...321 м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>. Збільшення останнього до рівня 396...415 м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup> обумовлює зменшення ступеня сіркоочищення до рівня 30...35 % (рис. 1, б). При цьому із представлених графічних даних видно, що збільшення об'єму газу, що поступає на рециркуляцію, прямопропорційно впливає на ступінь сіркоочищення (рис. 1, в). Найвище сіркоочищення (на рівні 45...50 %) досягається при показниках об'єму газу, що поступає на рециркуляцію, в межах 82...90 м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>. Зменшення цього показника до 62...64 м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup> характеризує зниження ступеня сіркоочищення до 33...34 % (рис. 1, в).

Із рис. 1 видно, що точки фактичних експериментальних даних мають певний розкид по графіку. За допомогою виконаної апроксимації даних та побудови математичної моделі лінійної залежності можливо з певною вірогідністю прогнозувати та регулювати результативність сіркоочищення. При цьому вплив температури перед адсорбером на ступінь сіркоочищення відповідає залежності (рис. 1, а):

$$y = -0,6283 \cdot x_1 + 120,4700;$$

де  $y$  – ступінь сіркоочищення димових газів, %;  
 $x_1$  – температура перед адсорбером, °C.

Якщо визначити вплив об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку на ступінь сіркоочищення, то можна використовувати наступну отриману залежність (рис. 1, б):

$$y = -0,1258 \cdot x_2 + 85,1370;$$

де  $y$  – ступінь сіркоочищення димових газів, %;  
 $x_2$  – об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, (х<sub>2</sub>, м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>).

При необхідності визначення, яким чином ступінь сіркоочищення залежить від об'єму газу, що поступає на рециркуляцію, можна застосовувати наступну побудовану залежність (рис. 1, в):

$$y = 0,5951 \cdot x_3 - 4,6816;$$

де  $y$  – ступінь сіркоочищення димових газів, %;  
 $x_3$  – об'єм газу, що поступає на рециркуляцію, (х<sub>2</sub>, м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>).

Проведена робота дозволяє виявити оптимальні області технологічних показників з подальшою оптимізацією технологічних процесів для підвищення ступеня сіркоочищення. При цьому враховується окремого цільового фактору на ступінь сіркоочищення. За допомогою побудованих математичних моделей можливо візуально простежити вплив факторів і вирахувати оптимальні умови для підвищення результативності процесу сіркоочищення димових газів із врахуванням технологічних аспектів виробництва. Отримані залежності можуть бути використані у промисловому металургійному виробництві, а також в інших галузях, функціонування яких супроводжується викидами в атмосферу газоподібних викидів з вмістом діоксиду сірки. Досягнення зниження забруднення димових газів діоксидом сірки сприяє запобіганню професійних ризиків та зменшенню шкідливого впливу на здоров'я працівників, а також підвищенню рівня екологічної безпеки.

## **6. Висновки**

На основі вимірних даних з використанням методу найменших квадратів побудовано математичні моделі подвійних залежностей ступеня сіркоочищення від деяких технологічних параметрів процесу фільтрації димових газів на металургійному підприємстві. Це дає

можливість оптимізувати технологічні показники із подальшим регулюванням процесу сіркоочищення щодо підвищення його ефективності. Для більшої показовості на основі отриманих залежностей побудовано та графічно наведено лінійні графіки наряду із фактичними точками вимірів, які мали певний розкид. Визначено, що в межах досліджених інтервалів ступінь сіркоочищення димових газів зворотнопропорційно залежить від температури перед адсорбером та об'єму газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, та прямопропорційно – від об'єму газу, що поступає на рециркуляцію. При цьому відносно високі показники ступеня сіркоочищення досягаються при температурі температура перед адсорбером на рівні 118...120 °С, об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку – 297...321 м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>, об'єм газу, що поступає на рециркуляцію – 82...90 м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>. Досягнення зниження забруднення димових газів діоксидом сірки сприяє запобіганню професійних ризиків та зменшенню шкідливого впливу на здоров'я працівників, а також підвищенню рівня екологічної безпеки.

## 7. Фінансування

Це дослідження не отримало конкретної фінансової підтримки.

## 8. Конкуруючі інтереси

Автори заявляють, що у них немає конкуруючих інтересів.

### Список використаних джерел

1. Milotić, M., Đurić, S., Čepić, Z., Adamović, D., Obrovski, B., Đorđić, D., Stošić, M. (2022). Experimental Investigation of SO<sub>2</sub> Removal from Flue Gases by Cleaning with Solution of Lime Suspension and Formic Acid Processes, 10(3), 537. <https://doi.org/10.3390/pr10030537>
2. Ma, L., Duan, X., Wu, J., Li, J., Peng, L., Wang, L., Xiao, L. (2022). Simultaneous desulfurization and denitrification of flue gas enabled by hydrojet cyclone. *Journal of Cleaner Production*, 337, 1, 134205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134205>
3. Деякі питання здійснення державного моніторингу в галузі охорони атмосферного повітря : Постанови КМ України від 14.08.2019 р. № 827. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>
4. Про охорону атмосферного повітря: Закон України від 16.10.2012 № 5456-VI
5. Shi, F., Li, K., Li, J., Ying, D., Jia, J., Sun, T., Yan, N., Zhang, X. (2021). Simultaneous wet

### References

1. Milotić, M., Đurić, S., Čepić, Z., Adamović, D., Obrovski, B., Đorđić, D., Stošić, M. (2022). Experimental Investigation of SO<sub>2</sub> Removal from Flue Gases by Cleaning with Solution of Lime Suspension and Formic Acid Processes, 10(3), 537. <https://doi.org/10.3390/pr10030537>
2. Ma, L., Duan, X., Wu, J., Li, J., Peng, L., Wang, L., Xiao, L. (2022). Simultaneous desulfurization and denitrification of flue gas enabled by hydrojet cyclone. *Journal of Cleaner Production*, 337, 1, 134205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134205>
3. Some issues of state monitoring in the field of atmospheric air protection: Resolution No. 827 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 14, 2019. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/827-2019-%D0%BF#Text>. (In Ukr.).
4. On Protection of Atmospheric Air: Law of Ukraine dated 16.10.2012, No. 5456-VI. (In Ukr.).

- absorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> with mixed Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>: Effects of mass concentration ratio and pH. *Chemical Engineering Journal*, 421, 1, 129945. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129945>
6. Kim, J., Lee, J., Cho, H., Ahn, Y. (2021). Life-cycle assessment of SO<sub>2</sub> removal from flue gas using carbonate melt. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 100, 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.013>
7. Muhammad Adli Hanif, Naimah Ibrahim, Aishah Abdul Jalil. (2020). Sulfur dioxide removal: An overview of regenerative flue gas desulfurization and factors affecting desulfurization capacity and sorbent regeneration. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27515–27540. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09191-4>
8. Петрищев А., Семірягін С., Смірнов О., Смірнов Ю., Цимбал Б. (2023). Запобігання професійних ризиків шкідливого впливу діоксиду сірки на здоров'я працівників та розвиток екологічної безпеки при очищенні промислових газів. *Social Development and Security*. Vol. 13. № 2. С. 161–170. <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.14>
5. Shi, F., Li, K., Li, J., Ying, D., Jia, J., Sun, T., Yan, N., Zhang, X. (2021). Simultaneous wet absorption of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> with mixed Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> and (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>: Effects of mass concentration ratio and pH. *Chemical Engineering Journal*, 421, 1, 129945. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129945>
6. Kim, J., Lee, J., Cho, H., Ahn, Y. (2021). Life-cycle assessment of SO<sub>2</sub> removal from flue gas using carbonate melt. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 100, 270-279. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2021.05.013>
7. Muhammad Adli Hanif, Naimah Ibrahim, Aishah Abdul Jalil. (2020). Sulfur dioxide removal: An overview of regenerative flue gas desulfurization and factors affecting desulfurization capacity and sorbent regeneration. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 27515–27540. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09191-4>
8. Petryshchev A., Semyriahyn S., Smirnov O., Smirnov Yu., Tsymbal B. (2023). Prevention of occupational risks of the harmful effects of sulfur dioxide on the health of workers and the development of environmental safety during the purification of industrial gases. *Social Development and Security*. Vol. 13. № 2. P. 161–170. (In Ukr.). <https://doi.org/10.33445/sds.2023.13.2.14>