

# Запобігання професійних ризиків шкідливого впливу діоксиду сірки на здоров'я працівників та розвиток екологічної безпеки при очищенні промислових газів

## 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

**Артем Петрищев \* A**

\* **Corresponding author:** к.тех.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: kafedrales@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2631-1723

**Сергій Семірягін B**

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

**Олексій Смірнов C**

д.тех.н., професор, завідувач відділу, e-mail: stalevoz@i.ua, ORCID: 0000-0001-5247-3908

**Юрій Смірнов C**

к.економ.н., доцент, старший науковий співробітник, e-mail: smirnoff.yuriy@gmail.com

**Богдан Цимбал D**

к.тех.н., доцент, доцент кафедри, e-mail: tsembalbogdan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2317-3428

**Artem Petryshchev \* A**

\* **Corresponding author:** Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of Department, e-mail: kafedrales@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2631-1723

**Sergiy Semyriahyn B**

Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Deputy CEO, e-mail: td.destal@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8733-3216

**Oleksiy Smirnov C**

Dr of Technical Sciences, professor, Head of the Department, e-mail: stalevoz@i.ua, ORCID: 0000-0001-5247-3908

**Yuriy Smirnov C**

PhD in Economics, Associate Professor, Senior Research Scientist, e-mail: smirnoff.yuriy@gmail.com

**Bohdan Tsybal D**

Candidate of Technical Sciences, Associated Professor, Associated Professor of Department, e-mail: tsembalbogdan@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2317-3428

<sup>A</sup> Національний університет "Запорізька політехніка", м. Запоріжжя, Україна

<sup>B</sup> ТОВ науково-виробниче підприємство "Дніпроенергосталь", м. Запоріжжя, Україна

<sup>C</sup> Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, м. Київ

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

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

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

<sup>C</sup> Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine

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

**Received:** April 5, 2023 | **Revised:** April 25, 2023 | **Accepted:** April 30, 2023

**DOI:** 10.33445/sds.2023.13.2.14

**Мета роботи:** попередження професійних ризиків та зниження шкідливого впливу на здоров'я працівників промислових димових газів разом із підвищенням екологічної безпеки.

**Метод дослідження:** регресійний аналіз.

**Результати дослідження:** побудовано багатofакторну математичну модель залежності ступеня сіркоочищення від технологічних параметрів процесу фільтрації димових газів на металургійному підприємстві.

**Практична цінність дослідження:** на основі промислових даних визначено залежність, що дозволяє регулювати значення ступеня сіркоочищення димових газів при зміні технологічних параметрів фільтрації із встановленням найбільш раціональних показників. Отримані результати можуть бути враховані у налагодженні виробничого процесу як металургійної галузі, так і інших промислових підприємств, наприклад, теплоелектростанцій.

**Цінність дослідження:** побудовано математичну модель залежності ступеня сіркоочищення від технологічних параметрів процесу фільтрації димових газів в промислових умовах.

**Purpose:** is the prevention of occupational risks and reduction of harmful effects on the health of workers of industrial flue gases, together with the improvement of environmental safety.

**Method:** regression analysis.

**Findings:** multifactorial mathematical model of the dependence of the degree of desulfurization on the technological parameters of the flue gas filtration process at the metallurgical enterprise was built on the basis of industrial data.

**Practical implications:** the dependence on the basis of industrial data was determined, which allows adjusting the value of the degree of desulfurization of flue gases when changing the technological parameters of filtration with the establishment of the most rational indicators. The obtained results can be taken into account in the adjustment of the production process of both the metallurgical industry and other industrial enterprises, for example, thermal power plants.

**Value:** the mathematical model of the dependence of the degree of desulfurization on the technological parameters of the flue gas filtration process in industrial conditions was built. The

Отримані результати представлено у вигляді рівняння багатофакторної регресії. Для більшої показовості на основі отриманої залежності побудовано та графічно наведено тривимірні графіки відповідно деяким із розглянутих технологічних параметрів.

**Майбутні дослідження:** розвиток майбутніх досліджень можливий в напрямку оптимізації побудованої математичної моделі.

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

obtained results are presented in the form of a multivariate regression equation. For greater visibility, based on the obtained dependence, three-dimensional graphs are constructed and graphically shown in accordance with some of the considered technological parameters.

**Future research:** the development of future research is possible in the direction of optimization of the constructed mathematical model.

**Paper type** calculation-practical and analytical.

**Ключові слова:** сіркоочищення, регресійний аналіз, безпека, праця.

**Key words:** desulfurization, regression analysis, safety, work.

## 1. Вступ

Світова потреба в енергії, зокрема в електроенергії, постійно зростає. Вископне паливо в даний час є основним джерелом енергії в світі. Спалювання вископного палива, 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. Деякі з них є токсичними, наприклад  $SO_x$ ,  $NO_x$ ,  $C_mH_n$ ,  $CO$  та летюча зола. Діоксид сірки є найбільш значущим оксидом сірки, який утворюється при спалюванні та викидається в атмосферу. Змішуючись із вологою в повітрі, продукти горіння створюють кислотні дощі, негативно впливають на екосистему. Через постійно зростаючі викиди газів в атмосферу та підвищення суворості норм щодо забруднення повітря, у всьому світі докладаються зусилля для зменшення викидів  $SO_2$  [1].

Вугілля широко використовується енергетичними, хімічними та іншими підприємствами як основне паливо. Через технічні або управлінські недоліки наразі велика кількість вугілля безпосередньо спалюється без попередньої обробки, що призводить до утворення великої кількості промислових димових газів, що містять  $SO_2$ . Це спричиняє забруднення навколишнього середовища та призводить до таких надзвичайних ситуацій, як кислотні дощі. Разом з цим потрапляння такого диму в дихальні шляхи людини призводить до шкоди функціонування серцево-легеневої системи. Тобто, з точки зору захисту як навколишнього середовища, так і здоров'я людини, концентрація  $SO_2$  димових газів необхідно контролювати [2].

Діоксид сірки  $SO_2$  є одним із основних забруднювачів повітря від димових газів виплавки кольорових металів.  $SO_2$  спричиняє багато екологічних проблем, таких як фотохімічний смог і забруднення міста дрібними частинками, а також впливає на здоров'я людини. Останніми роками забруднення димовими газами привертає все більше уваги, і існує багато відповідних досліджень технології видалення  $SO_2$ . Низка технологій було застосовано для контролю викидів  $SO_2$ , 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 [3].

Тобто актуальною є проблема раціоналізації параметрів сіркоочищення на промислових підприємствах із визначенням практично можливих шляхів щодо підвищення ступеня видалення діоксиду сірки із димових газів. Реалізація останнього забезпечить поліпшення екологічної безпеки середовища перебування людини та попередження професійних ризиків і зниження шкідливого впливу на здоров'я працівників промислових підприємств.

## 2. Теоретичні основи дослідження

Десульфурація димових газів, яка використовує карбонат кальцію ( $CaCO_3$ ), може ефективно видаляти  $SO_2$ , що викидається в атмосферу з електростанцій, і ефективність видалення та надійність цього процесу значно підвищилися, а його вартість значно зменшилася. Процес видалення  $SO_2$  з димового газу можна розділити на два типи скрубєрів, таких як сухий скрубєр

і вологий скруббер. Сухий скруббер – це установка десульфурації, в якій абсорбент  $\text{SO}_2$  впорскується в камеру згоряння на значній потужності для поглинання оксидів сірки. Цей скруббер може працювати з низькою вартістю обладнання та низьким споживанням енергії, але має низьку ефективність десульфурації через меншу швидкість відгуку, ніж мокрий скруббер. З іншого боку, мокрий скруббер є найбільш часто використовуваним процесом видалення  $\text{SO}_2$ , основним процесом із 87 % загальної глобальної потужності. Мокрий скруббер 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 [4].

Щоб контролювати викиди  $\text{SO}_2$  авторами роботи [5] був запропонований новий метод десульфурації за допомогою суспензії доменного пилу. Досліджено вплив температури реакції, концентрації кисню та співвідношення тверда речовина–рідина на ефективність видалення  $\text{SO}_2$ . Оптимальними умовами були температура реакції 35 °C, концентрація кисню 10 об. %, співвідношення тверда речовина–рідина 0,5 г / 300 мл. За оптимальних умов ефективність сіркоочистки досягала 100 % за 4 години. Результати показали, що концентрація кисню значно впливає на ефективність видалення  $\text{SO}_2$  та, опираючись на проведені дослідження, запропоновано можливий механізм десульфурації доменного пилу. Це дослідження пропонує перспективну, здійснену та недорогу технологію десульфурації шляхом повторного використання доменного пилу [5].

Авторами роботи [6] було виявлено явище, що  $\text{SO}_2$  може бути ефективно адсорбований на активованому вугіллі при відносно низьких температурах. З початковою концентрацією  $\text{SO}_2 = 1000$  ppmv, питома ємність зростала з 12,9 до 123,1 мг/г при зниженні температури від 80 до – 20 °C. Розроблено та випробувано пілотну випробувальну платформу з витратою димових газів 3600 Нм<sup>3</sup>/год. Викиди  $\text{SO}_2$  склали менше 1 ppmv, а прогнозована втрата енергії становили близько 3 % чистого виробництва.

В роботі [7] авторами пропонується інноваційна стратегія “переробки відходів за допомогою відходів” для десульфурації за допомогою пилу електродугової печі. Ефективність десульфурації зберігається, коли суспензія пилу електродугової печі є кислою, загальна маса суспензії зменшується приблизно на 60 % після дезактивації, а швидкість вилуговування Zn досягає 50 %. Запропоновано можливий механізм десульфурації із визначенням, що основними активними компонентами суспензії пилу електродугової печі є ZnO та ZnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>.

Авторами роботи [8] зазначено, що небезпечні тверді відходи, такі як доменний пил, багаті цінними металевими компонентами, до яких входить Fe, Zn, Mn. Разом з цим переробка доменного пилу або нешкідлива обробка є серйозною проблемою. У роботі [8] авторами запропоновано стратегію “переробки відходів разом із відходами” за допомогою доменного пилу для десульфурації. Експериментальні результати показали, що суспензія доменного пилу може досягти високоефективної десульфурації та відновлення ресурсів Zn. Результати характеристики свідчать про те, що ZnO та Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> у шламі доменного пилу є основними активними компонентами десульфурації, а споживання активних компонентів є основною причиною зниження активності шламу доменного пилу. За оптимальних умов (концентрація  $\text{SO}_2$  на рівні 3000 мг·м<sup>-3</sup>, температура реакції – 40 °C, швидкість потоку газу на вході – 300 мл·хв<sup>-1</sup>, співвідношення тверда речовина–рідина – 0,5 г/300 мл, швидкість перемішування – 600 об/хв), швидкість десульфурації досягає 100 %, а максимальна швидкість вилуговування Zn може досягати 44,6 %. На підставі результатів експерименту та характеристик було запропоновано можливий механізм десульфурації шламу доменного пилу.

Авторами роботи [9] було виконано моделювання потоку газу та твердих речовин у промисловій вежі десульфуризації напівсухим способом за допомогою підходу

обчислювальної динаміки частинок рідини. Запропоновано оптимізаційну схему регулювання газотвердого потоку в сіркоочисній башті. Визначено, що відносно стабільні робочі умови для газо-твердого потоку в десульфуризаційній вежі полягають у тому, що швидкість димового газу на вході та температура становлять 15 м/с і 393 К відповідно.

Авторами роботи [10] 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 вище зазначеного витікає, що доцільним є дослідження щодо визначення впливу технологічних параметрів сіркоочищення димових газів на ступінь зниження вмісту діоксиду сірки щодо підвищення ефективності процесу фільтрації. Досягнення 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**

Ситуація, що склалася свідчить про існування певних складнощів щодо раціоналізації параметрів сіркоочищення димових газів на промислових підприємствах. Проблеми шкідливої дії оксидів сірки при потраплянні димових газів в дихальні шляхи мають суттєве значення, так як пов'язані із небезпекою токсичної дії та шкоди функціонування серцево-легеневої системи людини. Це свідчить про необхідність визначення комплексного впливу технологічних параметрів ступінь сіркоочищення під час фільтрації димових газів із пошуком можливості регулювання процесу у бік підвищення ефективності. Отримання певних результатів в цьому напрямку може забезпечити запобігання професійних ризиків та зниження шкідливого впливу на здоров'я працівників, а також підвищення рівня екологічної безпеки.

### **4. Методологія дослідження**

В дослідженні було використано регресійний аналіз, що дозволило виразити забезпечення певного ступеня сіркоочищення димових газів з урахуванням комплексного впливу технологічних параметрів процесу фільтрації. Показник, який залежить від кількох факторів, можна описати за допомогою множинної регресії. Дослідивши взаємозв'язок факторів у проведених випробуваннях можна побудувати функціональний зв'язок між ними та з певною достовірністю планувати їх комплексний вплив у подальших дослідженнях з метою уточнення отриманих результатів.

Модель множинної регресії визначається рівнянням:

$$y_i = v_0 + v_1 x_1 + v_2 x_2 + \dots + v_i x_i;$$

де  $y_i$  – показник;  
 $x_i$  – фактори;  
 $v_i$  – параметри,  $i = \overline{1, n}$ .

Для надання залежності більшої точності і практичності деякі із лінійних показників  $x_i$

було замінено на нелінійні  $f(x_i)$ , перетворюючи цю модель на квазілінійну. Графічне вираження отриманої моделі представлялося у часткових залежностях у вигляді поверхонь.

## 5. Результати

Фактори, які досліджувалися в роботі, занесено в таблицю 1. Досліджено взаємозв'язок процесів і експериментально побудована функціональна залежність, що дозволило з деякою вірогідністю використовувати її в плануванні очікуваних технологічних показників. Ступінь сіркоочищення димових газів, що залежить від багатьох факторів, можна описати за допомогою нелінійної множинної регресії. Оцінки коефіцієнтів регресійної моделі знаходимо за допомогою методу найменших квадратів у матричній формі.

**Таблиця 1 – Досліджувані технологічні показники сіркоочищення димових газів**

№ п/п	Фактор					
	Температура перед адсорбером, °С	Об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, м <sup>3</sup> /год.×10 <sup>3</sup>	Об'єм газу, що поступає на рециркуляцію, м <sup>3</sup> /год.×10 <sup>3</sup>	Витрати вапна, т/год.	Запиленість після другої ланки адсорбера, мг/м <sup>3</sup>	Ступінь сіркоочищення димових газів, %
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$y$
1	114	318	78	0,218	22	27,02
2	119	330	85	0,349	14	30,18
3	128	329	80	0,229	13	29,59
4	127	342	86	0,002	13	24,05
5	123	343	83	0,251	3	28,91
6	127	411	72	0,494	4	35,06
7	137	415	78	0,344	5	35,59
8	136	414	77	0,208	2	28,45
9	147	406	74	0,281	2	28,93
10	137	391	62	0,112	4	34,27
11	137	396	76	0,105	1	30,73
12	140	386	64	0,301	3	33,33
13	131	382	70	0,091	4	26,06
14	125	340	88	0,035	2	26,79
15	121	332	87	0,566	2	45,09
16	119	339	90	0,413	2	45,11
17	128	330	85	0,496	2	47,62
18	125	329	83	0,321	4	44,51
19	120	331	86	0,314	2	50,06
20	118	321	82	0,443	2	50,12
21	118	319	81	0,483	3	47,68
22	118	297	75	0,164	2	48,27
23	116	305	76	0,267	2	42,19
24	123	315	75	0,289	2	38,27
25	131	321	72	0,293	4	37,50

В результаті було одержано математичну модель, яка має такий вид:

$$y = 14,1912 - 0,0004 \cdot x_1^2 + 12851,5153 \cdot \left(\frac{1}{x_2}\right) - 0,1004 \cdot x_3 + 28,2926 \cdot x_4 - 4,2446 \cdot \sqrt{x_5};$$

- де  $y$  – ступінь сіркоочищення димових газів, %;  
 $x_1$  – температура перед адсорбером, °C;  
 $x_2$  – об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку, м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>;  
 $x_3$  – об'єм газу, що поступає на рециркуляцію, м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>;  
 $x_4$  – витрати вапна, т/год.;  
 $x_5$  – запиленість після другої ланки адсорбера, мг/м<sup>3</sup>.

При побудові структури регресії, з одного боку, потрібно включити в регресію всі фактори, які мають істотний статистичний вплив на показник, а з іншого боку, потрібно, щоб було виконано умову лінійної незалежності між факторами, тобто відсутність мультиколінеарності для ефективного застосування методу найменших квадратів. Методом Фаррара-Глобера досліджуємо в зазначеній вище моделі присутність мультиколінеарності. Перевірка за допомогою тесту  $\chi^2$  показала, що з надійністю  $p=0,95$  існує загальна мультиколінеарність.

З виду кореляційної матриці було зроблено висновок, при якому між факторами  $x_2$  і  $x_3$  існує тісний зв'язок. Оскільки вплив на показник  $y$  фактора  $x_2$  більш значимий ( $r_{yx_2}=0,49$ ,  $r_{yx_3}=0,25$ ), то з регресії виключаємо фактор  $x_3$  для усунення мультиколінеарності.

З урахуванням перетворень математична модель набула наступний вид:

$$y = 2,9456 - 0,0002 \cdot x_1^2 + 12996,6537 \cdot \left( \frac{1}{x_2} \right) + 27,8207 \cdot x_4 - 4,2236 \cdot \sqrt{x_5};$$

Перевірка за допомогою тесту  $\chi^2$  показала, що мультиколінеарність залишилася, але значно зменшалася: на 20,92 % у порівнянні з попереднім випадком.

$t$ -тест на значимість коефіцієнтів регресії показав, що всі параметри регресії значимі, тобто жоден з факторів не можна виключити з регресії.

Згідно перевірки за допомогою критерію Фішера одержана модель адекватна статистичним даним. ( $F=17,002$ ,  $F_{\text{крит}}=2,87$ ).

Коефіцієнт кореляції (згідно "шкали Чеддока") вказує на високий функціональний зв'язок між факторами та результуючим значенням отриманої моделі ( $R^2=0,77$ ).

Коефіцієнти регресії з надійністю  $p=0,95$  перебувають у таких межах:

$$\begin{aligned} -54,6712 < \beta_0 < 60,5625, \\ -0,0018 < \beta_1 < 0,0014, \\ 1589,7240 < \beta_2 < 24394,5835, \\ 13,8438 < \beta_4 < 41,7976, \\ -6,5582 < \beta_5 < -1,8890. \end{aligned}$$

Значення "у" і довірчі інтервали для регресії зазначені на рис. 1, з якого маємо графічне підтвердження розрахункових значень, що одержана модель задовільно відповідає практичним даним.

Для наукового аналізу отриманої моделі побудовано три найбільш значимі із практичної точки зору часткові залежності у вигляді поверхонь на рис. 2 із закріпленням деяких параметрів:  $y_1=f(x_1, x_2) - x_4=0,301$  т/год,  $x_5=2$  мг/м<sup>3</sup>;  $y_2=f(x_2, x_4) - x_1=123$  °C,  $x_5=2$  мг/м<sup>3</sup>;  $y_3=f(x_4, x_5) - x_1=123$  °C,  $x_2=331$  м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>;

Проведена робота дозволяє виявити оптимальні області технологічних показників і витратних коефіцієнтів вихідних матеріалів з подальшою оптимізацією технологічних параметрів для підвищення ступеня сіркоочищення. При цьому одночасно враховується вплив відразу чотирьох факторів на ступінь сіркоочищення.

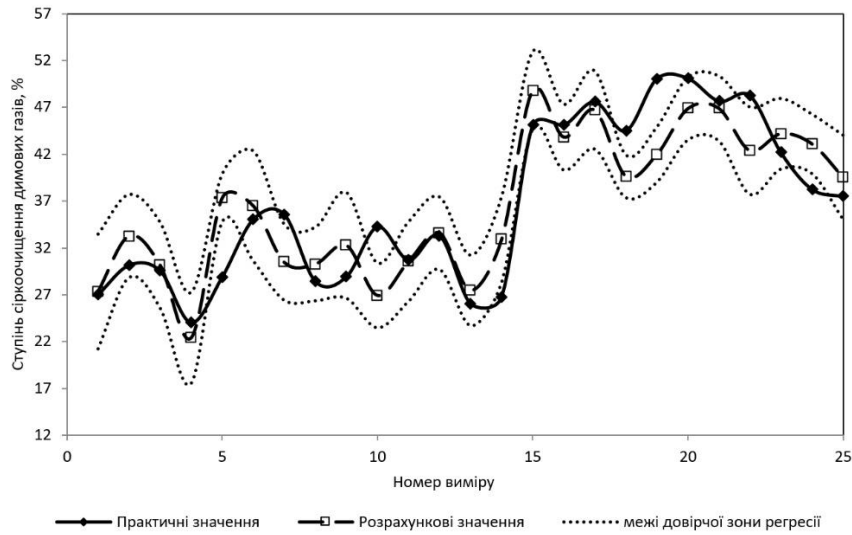


Рисунок 1 – Практичні й розрахункові значення ступеня сіркоочищення димових газів з позначенням верхньої й нижньої границі 95 % довірчої зони регресії

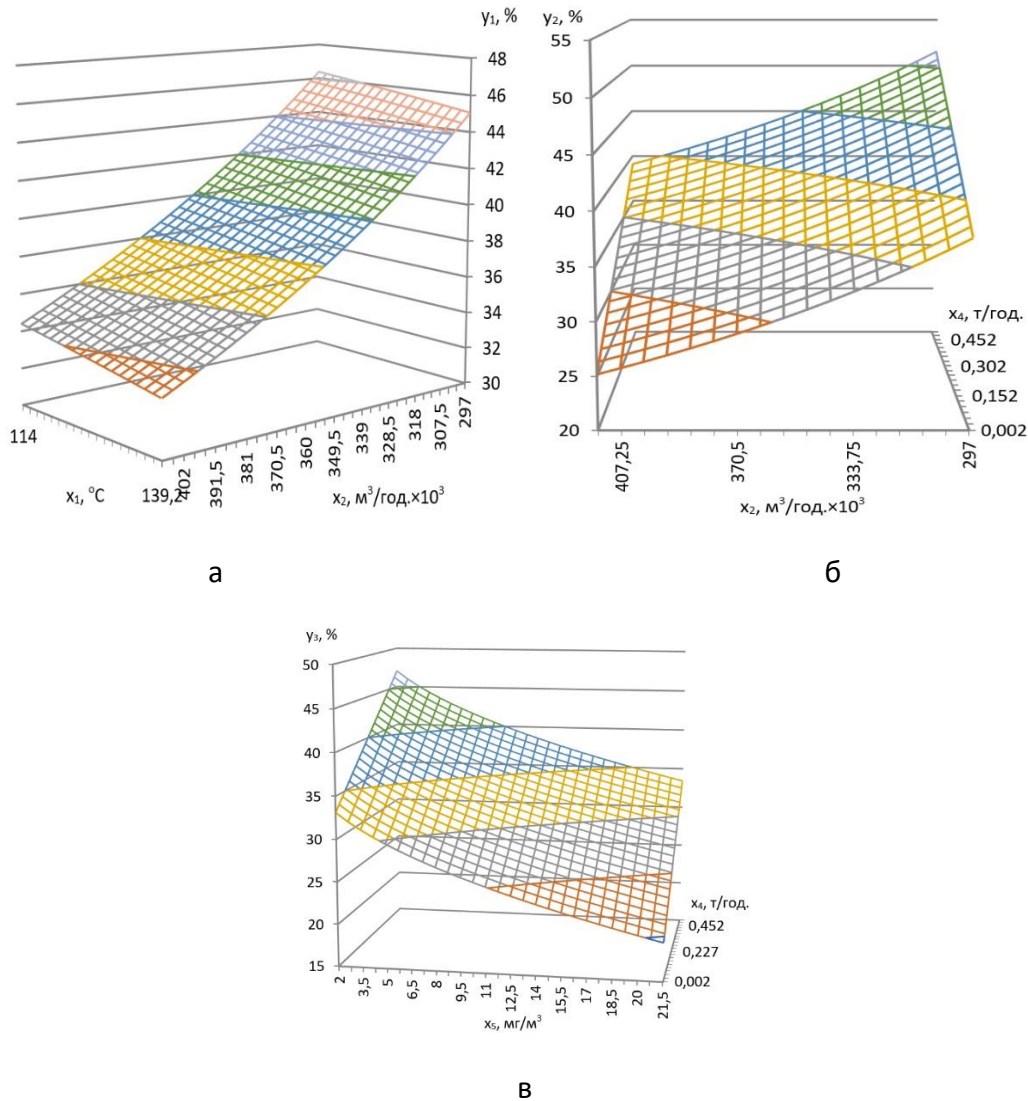


Рисунок 2 – Залежність ступеня сіркоочищення димових газів від деяких технологічних параметрів, описаних в табл. 1: а –  $y_1=f(x_1, x_2)$ ; б –  $y_2=f(x_2, x_4)$ ; в –  $y_3=f(x_4, x_5)$

Із побудованих графіків (рис. 2) витікає, що в межах досліджених інтервалів ступінь сіркоочищення димових газів ( $y_i$ , %) прямопропорційно залежить від витрати вапна ( $x_4$ , т/год.), та зворотнопропорційно – від температури перед адсорбером ( $x_1$ , °C), об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку ( $x_2$ , м<sup>3</sup>/год.×10<sup>3</sup>) та запиленості після другої ланки адсорбера ( $x_5$ , мг/м<sup>3</sup>). За допомогою побудованих поверхонь можливо візуально простежити комплексний 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 промислових даних побудовано багатофакторну математичну модель залежності ступеня сіркоочищення від технологічних параметрів процесу фільтрації димових газів на металургійному підприємстві. Це дає можливість оптимізувати технологічні показники із подальшим регулюванням процесу сіркоочищення щодо підвищення його ефективності. Отримані результати представлено у вигляді рівняння багатофакторної регресії із залежністю одного параметру одночасно від чотирьох факторів. Для більшої показовості на основі отриманої залежності побудовано та графічно наведено часткові тривимірні графіки у вигляді поверхонь відповідно деяким із розглянутих технологічних параметрів. Визначено, що в межах досліджених інтервалів ступінь сіркоочищення димових газів прямопропорційно залежить від витрати вапна, та зворотнопропорційно – від температури перед адсорбером, об'єм газу, що поступає в адсорбер на першу ланку та запиленості після другої ланки адсорбера. 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

### 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. 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>
4. 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>
5. Xie, B., Geng, N., Yu Q., He, D., Wang F., Liu, T., Gao, J., Ning, P., Song, X., Jia, L. (2022). Removal of SO<sub>2</sub> from flue gas using blast furnace dust as an adsorbent. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 15642–15653. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16842-7>
6. Wang, S., Xu, S., Gao, S., Xiao, P., Jiang, M., Zhao, H., Huang, B., Liu, L., Niu, H., Wang, J., Guo, D. (2021). Simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from flue gas by low-temperature adsorption over activated carbon. *Scientific Reports*, 11, 11003. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90532-9>
7. Jia, L., Hu, K., Jiang, E., Feng, J., Song, X., Ning, P., Yu, Q., Wang, H. (2023). A new strategy for the reuse of typical hazardous solid waste electric arc furnace dust (EAFD): Efficient desulfurization by EAFD slurry. *Separation and Purification Technology*, 308, 1, 122980. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122980>
8. Yang, X., Xie, B., Wang, F., Ning, P., Li, K., Jia, L., Feng, J., Xia, F. (2023). Resource utilization of hazardous solid waste blast flue gas enabled by hydrojet cyclone. *Journal of Cleaner Production*, 337, 1, 134205. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134205>
3. 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>
4. 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>
5. Xie, B., Geng, N., Yu Q., He, D., Wang F., Liu, T., Gao, J., Ning, P., Song, X., Jia, L. (2022). Removal of SO<sub>2</sub> from flue gas using blast furnace dust as an adsorbent. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 15642–15653. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16842-7>
6. Wang, S., Xu, S., Gao, S., Xiao, P., Jiang, M., Zhao, H., Huang, B., Liu, L., Niu, H., Wang, J., Guo, D. (2021). Simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> from flue gas by low-temperature adsorption over activated carbon. *Scientific Reports*, 11, 11003. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-90532-9>
7. Jia, L., Hu, K., Jiang, E., Feng, J., Song, X., Ning, P., Yu, Q., Wang, H. (2023). A new strategy for the reuse of typical hazardous solid waste electric arc furnace dust (EAFD): Efficient desulfurization by EAFD slurry. *Separation and Purification Technology*, 308, 1, 122980. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122980>
8. Yang, X., Xie, B., Wang, F., Ning, P., Li, K., Jia, L., Feng, J., Xia, F. (2023). Resource utilization of hazardous solid waste blast

- furnace dust: Efficient wet desulfurization and metal recovery. *Chemosphere*, 314, 137592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122980>
9. Liu, P., Wu, X., Li, H., Bo, Y., Wei, N. (2023). Simulation analysis of gas–solid flow characteristics and water evaporation in flue gas semi-dry desulphurization process based on CPFD method. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.24888>
10. 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>
- furnace dust: Efficient wet desulfurization and metal recovery. *Chemosphere*, 314, 137592. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122980>
9. Liu, P., Wu, X., Li, H., Bo, Y., Wei, N. (2023). Simulation analysis of gas–solid flow characteristics and water evaporation in flue gas semi-dry desulphurization process based on CPFD method. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1002/cjce.24888>
10. 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>