

А.С. Петрищев¹, С.В. Семірягін², Ю.О. Смірнов³

¹Національний університет «Запорізька політехніка», Україна

²ТОВ НВП «Дніпроенергосталь», Україна

³Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Україна

УНИКНЕННЯ ПРОФЕСІЙНИХ РИЗИКІВ ПРАЦІВНИКІВ ТА ТЕХНОГЕННИХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ПРИ ОЧИЩЕННІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВИКИДІВ

В статті розглядається питання підвищення ефективності очищення газоподібних викидів на металургійних підприємствах. Реалізація останнього з використанням математичного моделювання може забезпечити попередження професійних ризиків і зниження шкідливого впливу компонентів димових газів на здоров'я працівників, а також уникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру в промислово розвинених регіонах при перевищенні допустимих рівнів забруднення повітря.

Ключові слова: промислові гази, сіркоочищення, гігієна праці, ризики, професійні захворювання, екологічна безпека.

Постановка проблеми

Діоксид сірки утворюється при спалюванні та викидається в атмосферу, змішуючись із вологою в повітрі сприяє утворенню кислотних дощів, які 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 SO₂ [1]. Разом з цим потрапляння такого диму в дихальні шляхи працівників підприємств та жителів прилеглих територій призводить до шкоди функціонування серцево-легеневої системи людини [2]. SO₂ не тільки негативно впливає на здоров'я людини, а й спричиняє багато екологічних проблем, таких як фотохімічний смог і забруднення міста дрібними сірковмісними частинками. Останніми роками забруднення димовими газами привертає все більше уваги. Підвищення ефективності видалення SO₂ стали центром досліджень останнього часу [3]. Тобто актуальною є проблема підвищення ефективності очищення газоподібних викидів на промислових підприємствах із визначенням практично можливих шляхів щодо підвищення ступеня видалення діоксиду сірки із димових газів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Авторами роботи [4] було зазначено, що десульфурація димових газів, при якій використовується карбонат кальцію, може ефективно видаляти SO₂, що викидається в атмосферу, і ефективність видалення та надійність цього процесу значно підвищилися, а його вартість значно зменшилася. Мокрий скрубєр є найбільш часто використовуваним процесом видалення SO₂,

основним процесом із 87 % загальної глобальної потужності. В роботі [5] авторами було запропонований новий метод десульфурації за допомогою суспензії доменного пилу. Оптимальними умовами були температура реакції 35 °С, концентрація кисню 10 об. %, співвідношення «тверда речовина–рідина» 0,5 г на 300 мл. До недоліку можна віднести специфічність використаної сировини для фільтрації. Авторами роботи [6] було виявлено явище, що SO₂ може бути ефективно адсорбований на активованому вугіллі при відносно низьких температурах. З початковою концентрацією SO₂ = 1000 ppmv, питома ємність зростала з 12,9 до 123,1 мг/г при зниженні температури від 80 °С до –20 °С. Розроблено та випробувано пілотну випробувальну платформу з витратою димових газів 3600 Нм³/год. [6]. Але окрім пілотної випробувальної платформи залишається необхідність набування досвіду промислового впровадження у виробництві різної потужності та сфер діяльності. В роботі [7] авторами запропонована інноваційна стратегія десульфурації за допомогою пилу електродугової печі. Схожий напрям розвивали у своїх дослідженнях автори роботи [8], де в якості компоненту для десульфурації використовували доменний пил. В якості недоліку можна відмітити проблематичність забезпечення доступу до необхідної сировини для більшості виробництв, не пов'язаних з металургійною галуззю. Авторами роботи [9] було запропоновано оптимізаційну схему регулювання газотвердого потоку в сіркоочисній башті. Визначено, що відносно стабільні робочі умови полягають у швидкості димового газу на вході та температурі відповідно 15 м/с і 393 К.

Авторами роботи [10] зазначалося, що для отримання оптимальної ефективності видалення SO₂ такі як рН, концентрація SO₂ на вході та добавки, повинні відповідним чином регулюватися. Тобто отримання залежності впливу низки факторів десульфурації димових газів на цільовий показник зниження вмісту SO₂ дало б посилення значимості представленої в роботах інформації. Для досягнення цього раціональним буде використати математичне моделювання з отриманням багатофакторної залежності для підвищити ефективність очищення димових газів. Це буде сприяти запобіганню професійних ризиків та зменшенню шкідливого впливу на здоров'я працівників, а також уникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру.

Формулювання мети дослідження

Метою дослідження є попередження професійних ризиків та уникнення негативного впливу на здоров'я працівників димових викидів, а також надзвичайних ситуацій техногенного характеру, з використанням математичного моделювання щодо раціоналізації технологічних показників сіркоочищення на металургійних підприємствах.

Виклад основного матеріалу

В основі досліджень було використано показники процесу очищення димових газів від діоксиду сірки, отриманих в промислових умовах металургійного виробництва (табл. 1).

Таблиця 1

Досліджувані технологічні показники очищення димових газів від діоксиду сірки

№ п/п	Фактор					
	Витрати реагенту (вапна), т/год.		Запиленість після сіркоочищення, мг/м ³	Об'єм газу, що поступає на рециркуляцію, м ³ /год.×10 ³	Температура на іскрогаснику, °С	Ступінь сірко- очищення димових газів, %
	Первинний реагент	Вторинний реагент				
	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄	x ₅	y
1	0,645	0,425	33	100	111	37,73
2	0,755	1,850	107	103	111	64,18
3	0,725	1,450	102	122	106	73,52
4	0,657	1,820	117	127	111	61,37
5	0,565	1,800	103	125	114	67,07
6	0,881	1,675	55	112	130	56,26
7	0,200	1,500	134	111	113	44,43
8	0,400	1,200	58	105	112	36,88
9	0,102	0,600	27	107	111	42,33
10	0,371	1,600	126	110	120	38,74
11	0,100	0,721	70	95	136	24,66
12	0,266	1,334	112	95	128	33,38
13	0,125	0,805	109	97	113	27,93
14	0,281	0,593	46	94	109	28,96
15	0,693	0,253	37	102	112	44,65
16	0,429	0,447	43	105	122	38,99
17	0,191	0,995	58	97	118	32,90
18	1,148	0,889	85	97	115	57,00
19	1,101	1,042	97	100	116	58,03
20	0,434	1,595	113	97	117	42,55
21	0,552	1,277	104	87	109	34,34
22	0,424	1,300	122	104	115	32,16
23	0,357	1,357	135	95	117	34,99
24	0,770	0,652	38	76	115	35,72
25	0,663	0,635	84	77	104	41,71

Досліджено взаємозв'язок процесів і експериментально побудована функціональна залежність за допомогою нелінійної множинної регресії, що дозволяє з деякою вірогідністю використовувати її в плануванні очікуваних

технологічних показників. Оцінки коефіцієнтів регресійної моделі знаходили за допомогою методу найменших квадратів у матричній формі. Отримана математична модель має наступний вид:

$$y = -57,620 + 21,712 \cdot x_1^2 + 2,451 \cdot x_2^3 - 2,490 \cdot \ln x_3 + 0,453 \cdot x_4 + 6131,862 \cdot \frac{1}{x_5}, \quad (1)$$

де y – ступінь сіркоочищення димових газів, %, x_1 – витрати реагенту первинного (вапна), т/год., x_2 – витрати реагенту вторинного (вапна), т/год.; x_3 – запиленість після сіркоочищення, мг/м³; x_4 – об'єм газу, що поступає на рециркуляцію, м³/год.×10³; x_5 – на іскрогаснику, °С.

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 дослідили присутність в моделі (1) мультиколінеарності. Перевірка за допомогою тесту χ^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 у фактора x_2 більш значний ($\text{гух}_2=0,59$, $\text{гух}_3=0,21$), то з регресії було виключено фактор x_3 для усунення мультиколінеарності.

З урахуванням перетворень математична модель набула наступний вид:

$$y = -69,716 + 21,895 \cdot x_1^2 + 1,981 \cdot x_2^3 + 0,480 \cdot x_4 + 6079,189 \cdot \frac{1}{x_5}. \quad (2)$$

Перевірка за допомогою тесту χ^2 показала, що мультиколінеарність залишилася, але значно зменшалася: на 51,34 % 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.

($F=34,09$, $F_{\text{крит}}=2,87$). Коефіцієнти регресії з надійністю $p=0,95$ перебувають у таких межах: $-112,547 < \beta_0 < -26,885$, $15,494 < \beta_1 < 28,296$, $0,580 < \beta_2 < 3,381$, $0,253 < \beta_4 < 0,706$, $-8891979,923 < \beta_5 < 8904138,300$. Значення показника і довірчі інтервали для регресії зазначені на рис. 1, з якого маємо графічне підтвердження розрахункових значень, що одержана модель задовільно відповідає практичним даним.

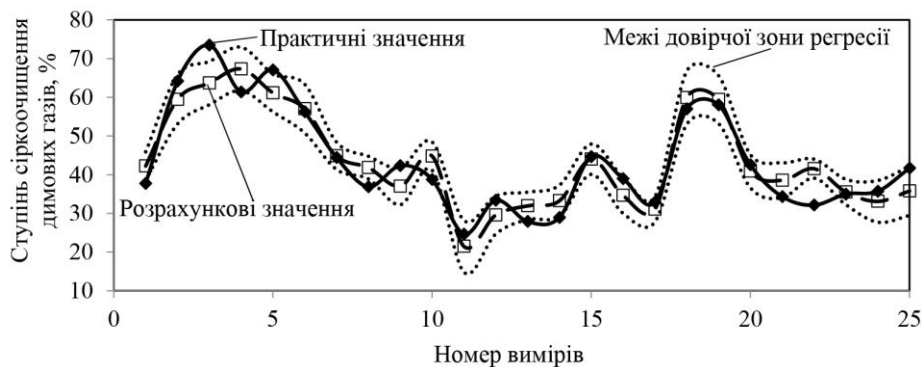


Рис. 1. Практичні та розраховані значення ступеню сіркоочищення димових газів з позначенням верхньої та нижньої границі 95 % довірчої зони регресії

Для наочного аналізу отриманої моделі побудовано три найбільш значимі із практичної точки зору часткові залежності у вигляді поверхонь на рис. 2, 3 із закріпленням деяких параметрів: $y_1=f(x_1, x_2) - x_4=107 \text{ м}^3/\text{год.}\times 10^3$, $x_5=120 \text{ }^\circ\text{C}$; $y_2=f(x_4,$

$x_5) - x_1=0,725 \text{ т/год.}$, $x_2=1,334 \text{ т/год.}$ Побудована математична модель дозволяє виявити оптимальні області технологічних показників і витратних коефіцієнтів реагентів з подальшим удосконаленням параметрів для підвищення ступеня сіркоочищення.

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. В межах досліджених інтервалів

показників ступінь сіркоочищення димових газів прямопропорційно залежить від витрати первинного та вторинного реагентів, а також об'єму газу, що поступає на рециркуляцію, та зворотнопропорційно – від температури на іскрогаснику (рис. 2).

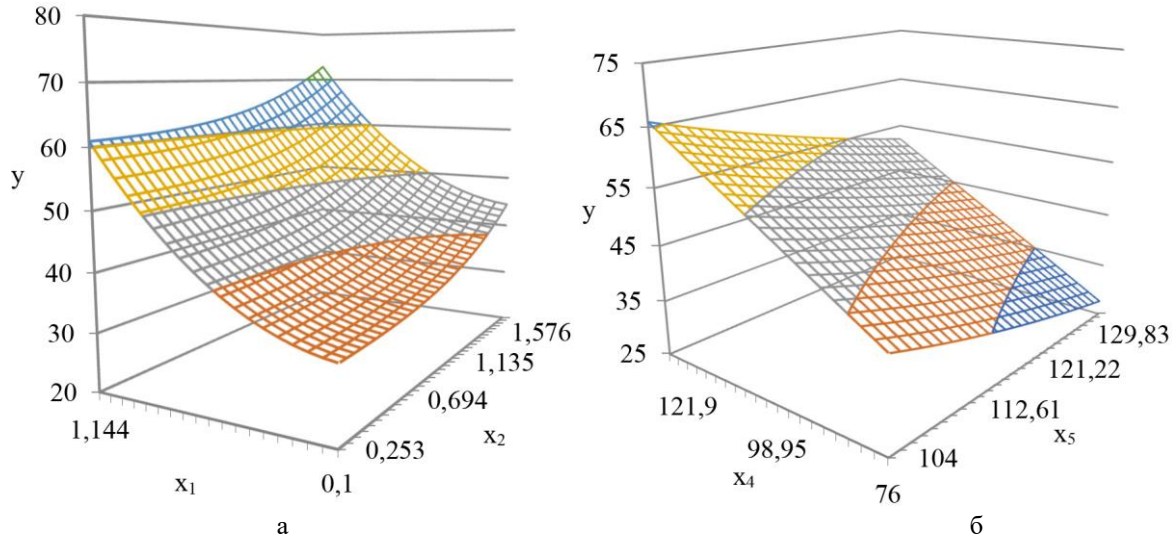


Рис. 2. Залежність ступеня сіркоочищення димових газів (у, %) від деяких факторів:
 а – від витрати первинного (x_1 , т/год.) та вторинного (x_2 , т/год.) реагентів відповідно
 б – від об'єму газу, що поступає на рециркуляцію (x_4 , м³/год.×10³) та температури на іскрогаснику (x_5 , °C)

Отримані залежності можуть бути використані у промисловому металургійному виробництві, а також в інших галузях, функціонування яких супроводжується викидами в атмосферу газоподібних продуктів 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 уникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру в промислово розвинених регіонах.

Висновки

1. Побудовано багатфакторну математичну модель залежності ступеня сіркоочищення від технологічних параметрів процесу фільтрації димових газів на металургійному підприємстві. Отримані результати представлено у вигляді рівняння багатфакторної регресії із залежністю одного параметру одночасно від чотирьох факторів.

2. Виконано графічне представлення часткових графіків у вигляді поверхонь відповідно деяким із розглянутих технологічних показників, що дає можливість оптимізувати промислові параметри із подальшим регулюванням процесу сіркоочищення щодо підвищення його ефективності.

3. Визначено, що в межах досліджених інтервалів показників ступінь сіркоочищення прямопропорційно залежить від витрати первинного та вторинного реагентів, а також об'єму газу, що поступає на рециркуляцію, та зворотнопропорційно – від температури на іскрогаснику. Досягнення зниження забруднення димових газів діоксидом сірки може забезпечити запобігання професійних ризиків і зниження шкідливого впливу компонентів димових газів на здоров'я працівників, а також уникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру в промислово розвинених регіонах при перевищенні допустимих рівнів забруднення повітряного середовища.

References

1. Milotić, M., Đurić, S., Čepić, Z., Adamović, D., Obrovski, B., Đorđić, D., Stošić, M. (2022). Experimental Investigation of SO₂ 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 denitration 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 SO₂ and

NO_x with mixed Na₂SO₃ and (NH₄)₂SO₃: 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 SO₂ 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 SO₂ 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 SO₂ and NO_x 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>

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.М. Смірнов, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України, Україна.

Автор: ПЕТРИЩЕВ Артем Станіславович
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
Національний університет «Запорізька
політехніка»
E-mail - kafedrales@ukr.net
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-2631-1723>

Автор: СЕМІРЯГІН Сергій Володимирович
кандидат технічних наук, доцент, заступник
генерального директора
ТОВ НВП «Дніпроенергосталь»
E-mail - td.destal@ukr.net
ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8733-3216>

Автор: СМІРНОВ Юрій Олексійович
кандидат економічних наук, доцент, старший
науковий співробітник
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
НАН України
E-mail - smirnoff.yuriy@gmail.com

AVOIDANCE OF OCCUPATIONAL RISKS OF WORKERS AND MAN-MADE EMERGENCY SITUATIONS DURING CLEANING OF METALLURGICAL EMISSIONS

A. Petryshchev¹, S. Semiriahyn², Yu. Smirnov³

¹National University «Zaporizhzhya Polytechnic», Ukraine

²LTD Scientific and Manufacturing Enterprise Dneproenerghostal, Ukraine

³Physico-technological Institute of Metals and Alloys of the NAS of Ukraine, Ukraine

The article highlights the problem of increasing the level of flue gas filtration at industrial enterprises using the example of the metallurgical industry with the determination of technologically possible ways to increase the level of sulfur removal from gaseous emissions into the atmosphere. This can prevent occupational risks for employees of enterprises due to the reduction of the harmful effects of the components of industrial emissions on occupational health. Increasing the level of understanding of the impact of technological parameters on the target result opens up opportunities for organizing a more balanced and stable flue gas cleaning process. This, in turn, increases the ability of factories to comply with sanitary standards and prevent emergencies of a man-made nature when the maximum permissible concentrations of harmful components in gaseous emissions are exceeded. Solving this problem is possible when using mathematical modeling based on determining the relationship between the level of sulfur removal and the technological indicators of the desulfurization process. Regression analysis was used as a method for building a mathematical model. At the same time, the construction of a multifactorial mathematical model was carried out, based on the industrial parameters of the production of the metallurgical enterprise. The visualization of the obtained results is carried out by presenting the constructed mathematical model as three-dimensional graphs in the form of surfaces with the involvement of some of the technological indicators. The obtained results make it possible to optimize the production indicators to increase the efficiency of the desulfurization of gaseous emissions of the industrial enterprise. At the same time, additional aspects of the relationship between filtration indicators and the degree of purification from harmful components in flue gases are revealed, which allows to establish the most favorable process conditions and can be used not only in the metallurgical industry, but also in the thermal power industry.

Keywords: industrial gases, desulfurization, labor hygiene, risks, occupational diseases, environmental safety.