



## KAPITEL 2 / CHAPTER 2<sup>2</sup>

### IMPLEMENTATION OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT CONCEPTION AT THE UKRAINIAN METALLURGY ENTERPRISES

DOI: 10.30890/2709-2313.2023-24-01-013

#### Вступ

Науково-технічний прогрес у гірничо-металургійному комплексі супроводжується значним техногенним впливом на навколишнє природне середовище (ОПС). Тому до основних завдань гірничо-металургійних підприємств входять розробка та реалізація комплексу заходів, що зменшують негативний вплив виробничої діяльності на всі сфери ОПС. Феросплавне виробництво займає одну з ключових позицій у металургійному комплексі України. Наявність відповідної сировинної бази зумовлює те, що Україна є одним із світових лідерів у виробництві марганцевих і кременистих феросплавів. Загальна потужність трансформаторів рудовідновлювальних печей (РВП) на феросплавних підприємствах України складає 1787 МВА (таблиця 1) [1].

В якості прикладу реалізації концепції сталого розвитку на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України розглянемо комплекс заходів, якій впроваджено на АТ «Нікопольський завод феросплавів» із залученням Національної металургійної академії України, та Державного підприємства Український Науково-технічний центр металургійної промисловості «ЕНЕРГОСТАЛЬ» (м. Харків).

Аналізуючи наскрізну технологічну схему великотоннажного виробництва марганцевих феросплавів, можна виділити наступні фактори, які здійснюють вплив на навколишнє середовище та заслуговують розробки заходів щодо зниження їх негативного впливу на довкілля (таблиця 2).

Таким чином, забезпечення стійкого екологічного розвитку АТ «Нікопольський завод феросплавів» реалізується системним взаємопов'язаним рішенням вказаних вище проблем. В першу чергу, в цій главі увагу буде приділено такому екологічному питанню виробництва великотоннажних марганцевих феросплавів, як забруднення повітря пилогазовими викидами.

---

<sup>2</sup>Authors: Zhadanos Oleksandr, Proidak Yurii, Derevyanko Ihor, Petrenko Maksym



Таблиця 4.1 – Географія феросплавного виробництва України [1]

Назва підприємства	Місце розташування	Сортамент продукції	Загальна потужність трансформаторів РВП
АТ «Нікопольський завод феросплавів»	м. Нікополь (Дніпропетровська область)	Марганцеві феросплави: феросилікомарганець, високо-, середньо-, низько-вуглецевий феромарганець, марганцеві флюси	1000 МВА
АТ «Запорізький завод феросплавів»	м. Запоріжжя	Кременисті феросплави: феросиліцій; Марганцеві феросплави: феросилікомарганець, високо-, середньо-, низько-вуглецевий феромарганець, металічний марганець	467 МВА
ТОВ «Побузький феронікелевий комбінат»	с.м.т. Побузьке (Кіровоградська область)	Феронікель	100 МВА



**Таблиця 2 - Комплексна оцінка факторів, що впливають на навколишнє середовище при виробництві великотоннажних марганцевих феросплавів [2]**

Отримання марганцевого агломерату	Виплавка марганцевих феросплавів у рудо-відновлювальних печах	Відходи, що утворюються внаслідок збагачення марганцевих руд і отримання марганцевого агломерату
<ul style="list-style-type: none"> <li>• викиди пилу і газів у тому числі парникових;</li> <li>• забруднення води, що використовується при виробництві марганцевого агломерату;</li> <li>• проблеми зберігання в шламосховищах пилу, уловленого системами газоочищення.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• викиди пилу і газів в тому числі парникових;</li> <li>• забруднення води, що використовується при виплавці марганцевих феросплавів;</li> <li>• проблеми зберігання в шламосховищах пилу, уловленого системами газоочищення;</li> <li>• утворення шлакометалічних відходів при виплавці марганцевих феросплавів.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• проблеми використання води при зберіганні шламів в шламосховищах.</li> <li>• відчуження земель, більша частина з яких придатна для використання в сільському господарстві;</li> <li>• порушення природного гідрологічного режиму на значній території, прилеглої до кар'єрів;</li> <li>• забруднення підземних вод;</li> <li>• підвищення на прилеглих територіях концентрації шкідливих речовин внаслідок забруднення атмосферного повітря пилом.</li> </ul>

## 2.1. Стисла характеристика Нікопольського заводу феросплавів

Нікопольський завод феросплавів це найбільше підприємство з виробництва феросплавів в Україні, що входить у топ 20 найбільших феросплавних заводів Світу. На цьому підприємстві виробляється до 11% всіх



марганцевих феросплавів світу.

Основною продукцією АТ "Нікопольський завод феросплавів" є марганцеві феросплави - ферросилікомарганець, високо і середньовуглецевий феромарганець, що виплавляються на найбільших в світі феросплавних печах потужністю 22,5-81 МВА, а також флюси (зварювальні та для електрошлакової переплавки). Виробничі потужності дозволяють випускати більше 1,0 млн. тонн на рік силікомарганцю, 250 тис. тон/рік високовуглецевого феромарганцю, понад 15 тис. тон/рік середньовуглецевого феромарганцю, до 60 тис. тон/рік флюсів різних марок, 50 тис. тон/рік електродної маси [3]. Продукція Нікопольського заводу феросплавів поставляється в різні регіони світу. Сумарна номінальна потужність трансформаторів рудовідновлювальних печей цього заводу становить 1000 МВ·А (середнє споживання електричної енергії Хмельницької та Тернопільської областей разом), що становить 60% потужності всіх феросплавних заводів України.

Нікопольський завод феросплавів включає в себе наступні цехи [3]: Цех з виробництва феросплавів, флюсоплавильний цех, агломераційний цех, ділянка переробки шлаків, цех електродної маси, відділення гідроочисних споруд і водопостачання, теплосиловий цех, залізничний цех, автотранспортний цех.

Основними підрозділами НЗФ є цех виробництва феросплавів, агломераційний цех, флюсоплавильний цех.

Цех виробництва феросплавів складається з наступних технологічних ділянок [3]:

- Основні виробничі ділянки №1 (2 печі РКГ-81, 2 печі РПГ-63, 1 піч РПГ-48, 3 печі РПЗ-48) і №2 (2 печі РКЗ-22,5, 4 печі РПЗ-48, 2 печі РКГ-81), ділянки шихтопідготовки №1, №2, ділянки розливних машин №1 і №2, склади готової продукції №1 і №2.

У пічному прольоті двох виробничих ділянок встановлено 16 рудовідновлювальних електропечей в тому числі: 4 печі РКГ-81 (рудовідновлювальні круглі герметичні печі виробництва японської фірми Танабе з потужністю трансформатору 81 МВ·А), 2 печі РПГ-63 (прямокутні рудовідновлювальні герметичні 6-ти електродні печі з потужністю трансформатору 63 МВ·А), 1 піч РПГ-48 (параметри відповідні печам РПГ-63), 7 печей РПЗ – 48 (прямокутні рудовідновлювальні закриті 6-ти електродні печі з потужністю трансформатору 63 МВ·А), 2 печі РКЗ-22,5 (рудовідновлювальні круглі закриті печі з потужністю трансформатору 22,5 МВ·А) [3].



Флюсоплавильний цех запроектований в складі шести печей типу СКБ-6063 потужністю по 2,5 МВ·А для виплавки флюсів: зварювальних і для електрошлакового переплаву з річним обсягом виробництва 40 тис. т. Також цех освоїв технологію виплавки середньовуглецевого феромарганцю. Флюсоплавильний цех включає наступні ділянки: плавильний проліт; склад шихтових матеріалів; дільницю переробки флюсів і феромарганцю; ділянку упаковки флюсів; футерувальну ділянку; склад готової продукції. 4 печі СКБ-6063 працюють на виробництво середньовуглецевого феромарганцю, а 2 печі використовуються для виплавки флюсів.

Агломераційний цех призначений для забезпечення цеху виробництва феросплавів агломератом і підготовленими шихтовими матеріалами. Цех обладнано агломераційними машинами типу АКМ-5-105.

## **2.2. Загальна характеристика пилогазових викидів при виробництві марганцевих феросплавів**

При підготовці марганцеворудної сировини і виплавці марганцевих феросплавів основні забруднюючі речовини, що викидаються в атмосферу від стаціонарних джерел, можна умовно розділити на тверді (метали та їх сполуки, сажа) і газоподібні (оксиди сірки, азоту, вуглецю та ін.) [4]. Основними джерелами пилогазових утворень, що надходять в атмосферне повітря, на НЗФ є аглоцех (АГЦ) і цех виробництва феросплавів (ЦПФ). В аглоцеху знаходиться 31 джерело викидів з висотою труб до 120 м. Обсяг пилогазових викидів, що надходить в атмосферу від цього цеху, досягає 1530 м<sup>3</sup>/с. Загальна маса викидів шкідливих речовин становить 688 г/с, в тому числі, пилу марганцю (у перерахунку на MnO<sub>2</sub>) 13 г/с (1,9% викидів), інших зважених речовин 28 г/с (4,1%), монооксиду вуглецю 629 г/с (91,4%), сірчистого ангідриду SO<sub>2</sub> - 3,08 г/с (0,4%), оксидів азоту NO<sub>x</sub> - 15,33 г/с (2,2%) (рисунок 1) [4].

У цеху виробництва феросплавів від 34 джерел з висотою труб від 25 до 70 м обсяг пилу і газів, що надходять в атмосферу, становить 2653 м<sup>3</sup>/с, а загальна маса викидів шкідливих речовин - 360 г/с, з них: пилу марганцю (у перерахунку на MnO<sub>2</sub>) 8 г/с (2,22%), інших зважених речовин 13 г/с (3,61%), монооксиду вуглецю 317 г/с (88,2%), сірчистого ангідриду 13,71 г/с (3,8%), двоокису азоту 7,53 г/с (2,08%) (рисунок 2) [4].

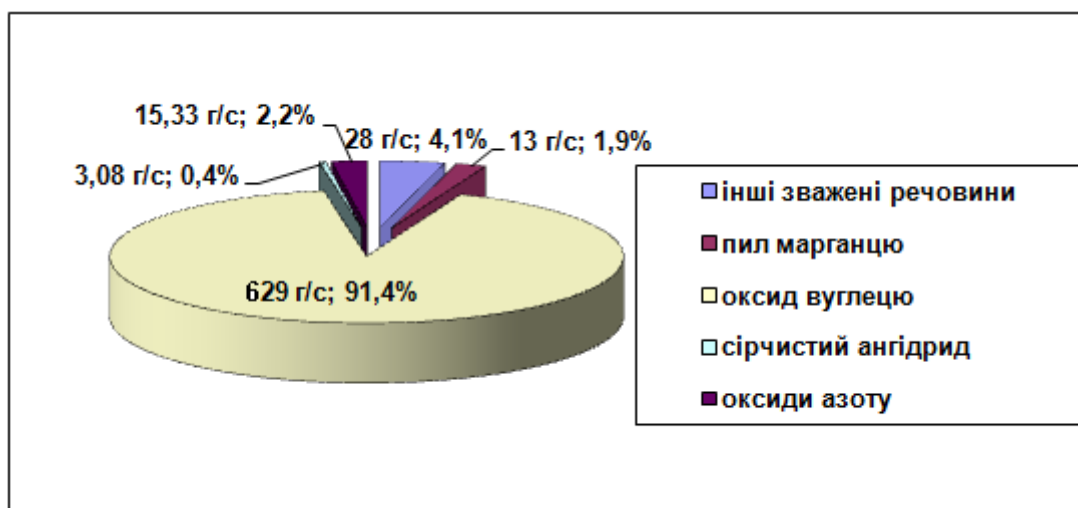


Рисунок 1 – Структура пилогазових викидів аглоцеху АТ «НЗФ» [4]

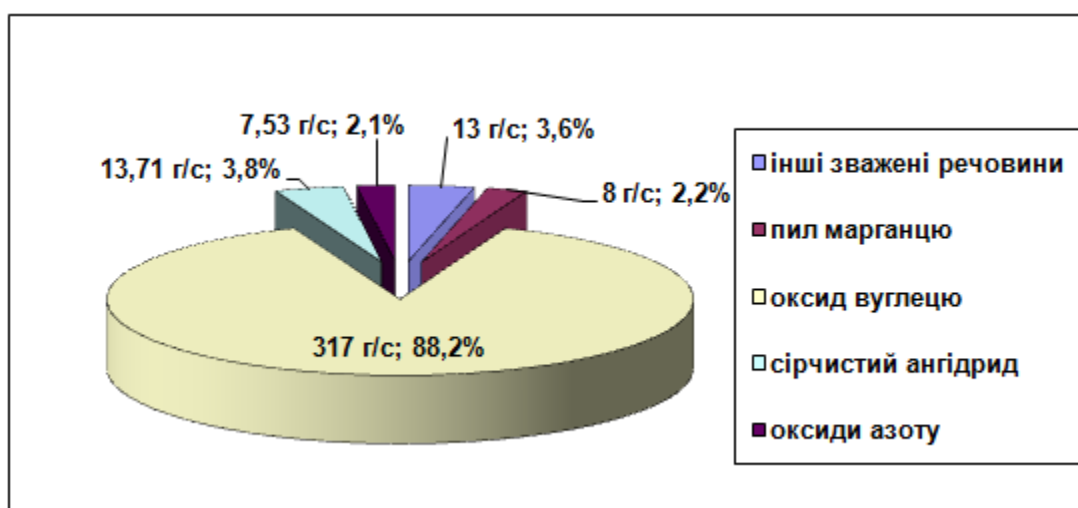


Рисунок 2 – Структура пилогазових викидів від феросплавних електропечей цеху з виробництва марганцевих феросплавів на АТ «НЗФ» [4]

Шкідливі речовини, що викидаються в атмосферу на АТ «НЗФ», характеризуються 2-4 класами небезпеки шкідливих речовин. Підписавши угоду з Євросоюзом про асоційоване членство, Україна зобов'язалася привести свої екологічні нормативи у відповідність до європейського законодавства. Тому доцільно порівняти чинні в Україні нормативи щодо приземних концентрацій шкідливих речовин у населених пунктах із нормами ЄС, які встановлені Європейським агентством з навколишнього середовища - агентством ЄС, що займається створенням мережі спостереження за навколишнім середовищем [5]. Діяльність агентства регулюється Керівною радою, яка складається з представників урядів 33 держав, представника Європейської комісії та двох



вчених, призначених Європейським парламентом. Агентство почало функціонувати в 1994 році, а його штаб-квартира знаходиться в Копенгагені. Оскільки агентство належить ЄС, всі країни, що входять до ЄС, автоматично стають його членами. Але й інші держави, уклавши угоду із союзом, можуть увійти до агенції. На даний момент в агентство входить 33 держави: 28 держав-членів ЄС, а також Ісландія, Ліхтенштейн, Норвегія, Туреччина та Швейцарія [5]. Порівняльний аналіз екологічних вимог щодо приземних гранично допустимих концентрацій (ГДК) шкідливих речовин у населених пунктах України та країн ЄС представлений у табл. 3 [6].

Аналіз даних таблиці 3 показує, що українські норми на допустимий вміст CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> у викидах суворіші за європейські. Водночас у ЄС до підприємств висувають суворіші вимоги щодо викидів недиференційованого пилу та сполук марганцю. Відповідно до рекомендації Європейського регіонального бюро Всесвітньої організації охорони здоров'я [9] в ЄС був прийнятий стандарт PM<sub>10</sub>, згідно з яким пил з частинками розміром менше 10 мкм є високотоксичним незалежно від її хімічного складу, оскільки такі частинки глибоко проникають у легеневу систему людини та викликають запальні захворювання. дихальних шляхів та легень.

З використанням спектрального, хімічного, петрографічного та рентгеноструктурного аналізів виконано речовинний склад пилу газоочищення аспіраційних систем, що містить марганець. Виконані дослідження [10] дозволили визначити хімічний (таблиця 4) та дисперсний (таблиця 5) склад пилу, що утворюється при виплавці феросплавів MnC17 та FMn78.

Тому, не дивлячись на досягнуті успіхи необхідно подальше вдосконалення систем пиловловлення при виробництві марганцевого агломерату і подальшого плавлення феросилікомарганцю та високовуглецевого феромарганцю.

З точки зору скорочення пилогазових викидів при феросплавному виробництві можна виділити три основні задачі:

- Впровадження нових і реконструкція існуючих систем газоочищення
- Аудит емісії діоксиду вуглецю при агломерації марганцеворудної сировини і виплавці марганцевих феросплавів;
- Скорочення емісії діоксиду вуглецю за рахунок використання ферогазу в якості енергоносія.





**Таблиця 3 – Порівняльні вимоги до приземних ГДК в населених пунктах України і країн ЄС [6-8]**

Забруднююча речовина	Час усереднення, год	ГДК, мг/м <sup>3</sup> , для населених пунктів	
		України	країн ЄС
Оксид вуглецю	0,5	5	–
	8	–	10
	24	3	–
Оксиди азоту в перерахунку на діоксид азоту	0,5	0,2	–
	1	–	0,2 (допустимо перевищувати цю норму до 8 разів на рік)
	24	0,04	–
	Річна норма	–	0,04
Діоксид і триоксид сірки в перерахунку на діоксид сірки	0,5	0,5	–
	1	–	0,35 (допустимо перевищувати цю норму не більше 24 разів на рік)
	24	0,05	0,125 (допустимо перевищувати цю норму до 3 разів на рік)
Марганець і його сполуки	0,5	0,01	–
	24	0,001	–
	Річна норма	–	0,00015
Речовини в вигляді стч, не диференційованих за складом	0,5	0,5	–
	24	0,15	0,05 (норма не повинна бити перевищена більш ніж 3 рази на рік)
	Річна норма	–	0,02
PM <sub>10</sub> (пил з частинками до 10 мкм)	0,5	–	–
	24	–	0,05 (норма не повинна бити перевищена більш ніж 35 разів на рік)
	Річна норма	–	0,04





**Таблиця 4 – Хімічний склад пилу, що утворюється при виплавці  
МнС17 і ФМн78 [10]**

SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	сажа	п.п.п
9,8	5,65	6,5	10,7	1,6	43	0,06	0,63	22,06

**Таблиця 5 – Дисперсний склад пилу, що утворюється при виплавці  
МнС17 і ФМн78 [10]**

Розмір, мкм	50-250	10-50	5-10	2-5	1-2	<1
%	1,7	16,4	15,6	23,3	15,2	27,3

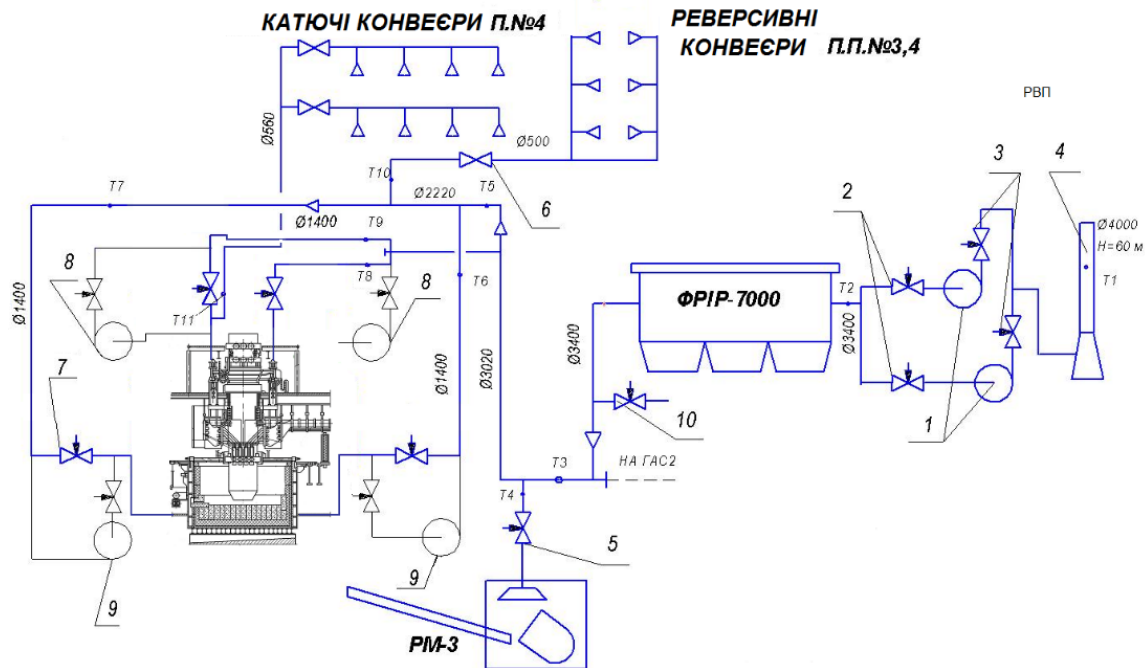
### 2.3. Вдосконалення систем очищення пилогазових викидів

Щодо рішення питання скорочення обсягу викидів АТ «Нікопольський завод феросплавів» тісно співпрацює з УкрГНТЦ «Енергосталь», котрий є головним інститутом в Україні з уловлювання і очищення промислових газів [11].

В якості прикладу розглянемо один з проектів по впровадженню сучасних систем очищення газів - газоаспіраційної станції ГАС-5 (рисунок 3) потужністю 500000 м<sup>3</sup>/г з рукавним фільтром з імпульсною регенерацією ФРІР-7000 (рисунок 4). ГАС-5 призначена для уловлювання, транспортування і очищення пило газових викидів від льоток і зонту печі РПЗ-63, кантувальної камери розливної машини РМ-3) [12].

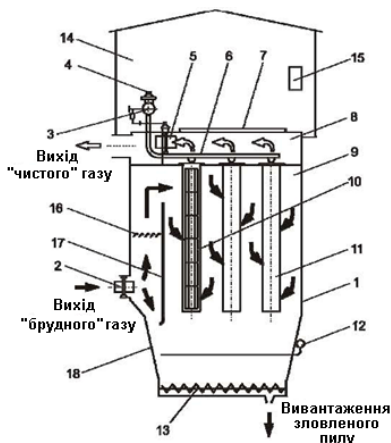
Ефективність введеної в експлуатацію ГАС-5 підтверджена дослідженнями газових викидів, які відходять від технологічного обладнання цеху виробництва феросплавів. Спорудження ГАС-5 дозволило знизити викиди забруднюючих речовин в атмосферу на 89,7 т/рік.

АТ «НЗФ» продовжує реалізацію амбіційних планів з подальшого скорочення викидів.



**Рисунок 3 - Принципова схема газовідводів і газоочищення пілогозових утворень рукавним фільтром ФРІР-7000 [12]:**

1 – димососи ДН-26x2; 2 – клапани 1774x3550; 3 – клапани 1580x3160; 4 – димова труба; 5 – клапан Ду1400 після РМ-3; 6 – шибер Ду500; 7 – клапан Ду1400; 8 – димососи ДН-18x2; 9 – димососи ДН-19; 10 – клапан Ду1400 підсосу холодного повітря



**Рисунок 4 - Схема устрою рукавного фільтра ФРІР-7000 [13]:**

1 - корпус фільтра; 2, 5 - відсічний клапан; 3 - накопичувач стиснутого повітря; 4 - продувний клапан; 6 - роздатковий колектор; 7 - знімна відкидна кришка; 8 - камера «чистого» газу; 9 - камера «брудного» газу; 10 - каркас рукава; 11 - фільтрувальний рукав; 12 - система пневмообвалення; 13 - вузол вивантаження пилу; 14 - намет фільтра; 15 - пристрій управління регенерацією; 16 - аеродинамічна решітка; 17 - відбійний щит; 18 – бункер



## 2.4. Аудит емісії діоксиду вуглецю при агломерації марганцеворудної сировини і виплавці марганцевих феросплавів

У зв'язку зі специфікою фізико-хімічних процесів виробництва марганцевих феросплавів 90% загального обсягу пилогазових викидів становить СО, який згодом у атмосфері окислюється до СО<sub>2</sub>. Процеси, що відбуваються при виробництві марганцевих феросплавів, супроводжуються утворенням і виділенням СО не внаслідок спалювання палива, а в результаті складних фізико-хімічних процесів за участю твердого вуглецю [3]. Утворений у ваннах феросплавних електропечей колошниковий газ феросплавних печей (ферогаз) в основному вловлюється, очищується і використовується, а зовсім невелика частина виділяється через шихту і надходить в атмосферу через системи пиловловлення та найбільш досконалі системи газоочищення. Тому вирішення важливого завдання щодо зниження викидів СО<sub>2</sub> актуально для феросплавного виробництва та має міжгалузеве значення у зв'язку із зобов'язаннями України, взятими під час підписання Кіотського протоколу. Найголовнішими напрямками для зниження викидів парникових газів під час виплавки марганцевих феросплавів є: аудит емісії діоксиду вуглецю під час виробництва марганцевих феросплавів; скорочення емісії діоксиду вуглецю за рахунок використання ферогазу як енергоносії при запаленні аглошихти.

Для оцінювання обсягів діоксиду вуглецю, що викидається у повітря при виробництві феросилікомарганцю і високовуглецевого феромарганцю, науковцями кафедри електрометалургії Національної металургійної академії України спільно з представниками АТ «НЗФ» виконано математичне оцінювання емісії СО<sub>2</sub> при агломерації марганцеворудної сировини і при виплавці марганцевих феросплавів [14].

Результати розрахунків емісії діоксиду вуглецю в процесі агломерації в залежності від марки марганцевого агломерату та виду газоподібного палива: колошникового газу феросплавних печей (містить 70% СО) та природного газу представлені в таблиця 6.

Розрахунками встановлено, що використання ферогазу для запалювання палива замість природного газу в процесі агломерації марганцеворудного сировини дозволило скоротити емісію діоксиду вуглецю на 12 кг/т агломерату.



**Таблиця 6 - Емісія діоксиду вуглецю в процесі агломерації в залежності від марки марганцевого агломерату і виду газоподібного палива: [14]**

Газоподібне паливо	Емісія CO <sub>2</sub> (кг/т) при отриманні різних марок агломерату				
	АМНВ-1	АМНВ-1А	АМНВ-2	АМНВ-2П	АМНВ-М
ферогаз	346,76	341,38	308,19	297,44	347,38
природний газ	358,73	353,35	320,16	309,41	359,35

Встановлено, що при виплавці 1 т ФМн78 емісія CO<sub>2</sub> становить 992 кг/т (505 м<sup>3</sup>/т), а при отриманні 1 т МнС17 в атмосферу викидається CO<sub>2</sub> в кількості 1150 кг/т (585 м<sup>3</sup>/т).

Результати розрахунків наскрізної емісії CO<sub>2</sub> за технологічною схемою агломерація марганцеворудної сировини - виплавка високовуглецевого феромарганцю ФМн78 і феросилікомарганцю МнС17 в рудовідновних печах при використанні різних марок марганцевого агломерату і газоподібного палива представлені в таблиця 7.

**Таблиця 7. - Сумарна емісія CO<sub>2</sub> за технологічною схемою агломерація марганцеворудної сировини - виплавка феромарганцю ФМн78 і феросилікомарганцю МнС17 [14]**

Марка феросплаву	Газоподібне паливо	Емісія CO <sub>2</sub> (кг/т) при використанні різних марок агломерату				
		АМНВ-1	АМНВ-1А	АМНВ-2	АМНВ-2П	АМНВ-М
ФМн78	ферогаз	1668	1650	1766	1736	1888
	природний газ	1692	1674	1796	1766	1919
МнС17	ферогаз	1715	1700	1796	1769	1897
	природний газ	1735	1719	1821	1794	1923

Встановлено, що застосування ферогазу замість природного газу для запалювання палива при агломерації дозволяє знизити емісію CO<sub>2</sub> при виробництві ФМн78 на 24-31 кг / т (1,4-1,7%), а при виробництві МнС17 на 19-26 кг / т ( 1,1-1,4%). Отримана математична модель дозволяє оцінювати обсяг емісії CO<sub>2</sub> і ефективність прийнятих технологічних рішень по скороченню викидів парникових газів та підвищення енергоефективності виробництва. В

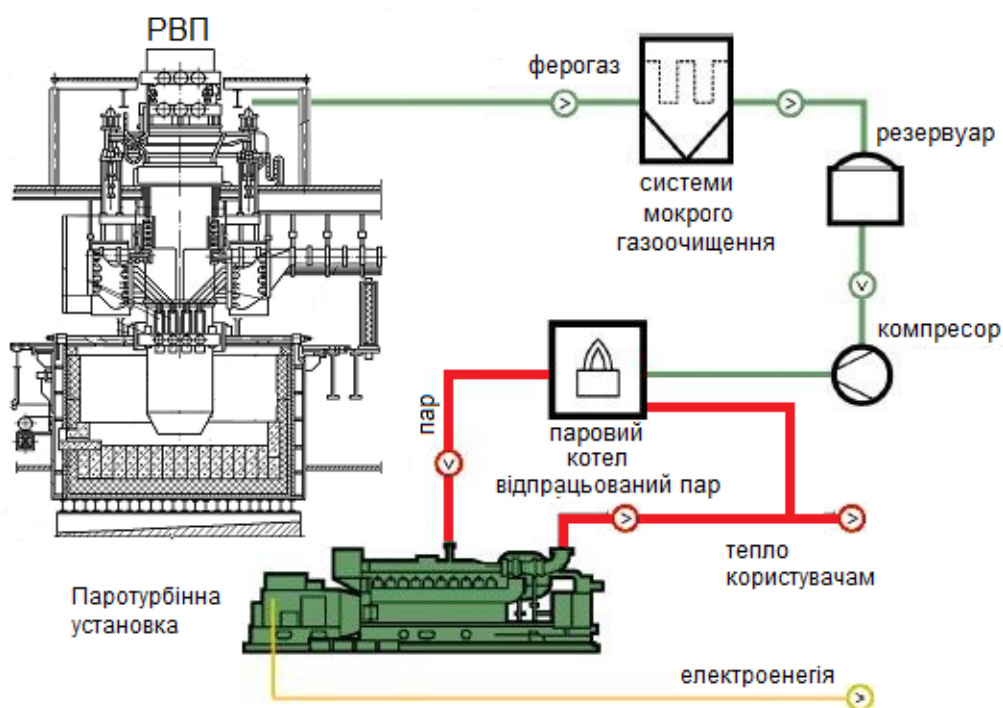


середньому на Нікопольському заводі феросплавів для процесу агломерації використано 28,2 млн. м<sup>3</sup> фєрогазу на рік, що дозволяє замінити 7,05 млн. м<sup>3</sup> природного газу і, тим самим, знизити викиди CO<sub>2</sub> в атмосферу. Встановлено, що економія 7,050 млн м<sup>3</sup> природного газу за рахунок розробленої технології запалювання аглошихти фєрогазом дозволила знизити викиди діоксиду вуглецю на 57 тис. ERU<sup>3</sup> (8,08 тис. ERU на 1 млн. м<sup>3</sup> природного газу) [15].

## 2.5. Скорочення емісії діоксиду вуглецю за рахунок використання фєрогазу в якості енергоносія

Фєрогаз утворюється в цеху виробництва феросплавів (ЦВФ) і споживається в агломераційному цеху (АГЦ) в якості палива при запалюванні аглошихти, в теплосиловому цеху (ТСЦ) в водогрійних і парових котлах, на ділянці шлакового лиття (ДШЛ) в якості палива в методичних печах, в гаражах розморожування вологих сипучих вантажів в залізничному цеху (ЗЦ) в зимову пору року, при сушінні ковшів в ЦВФ. Завдяки цьому, наприклад, в 2011 році при використанні 173,848 млн.м<sup>3</sup> феросплавного газу завод спожив 3,297 млн. м<sup>3</sup> природного газу, тобто всього близько 7% від загального обсягу в умовному паливі. Застосування фєрогазу замість природного газу в технологічних процесах виробництва феросплавів також сприяє зниженню емісії діоксиду вуглецю. Наприклад використання 145,648 млн. м<sup>3</sup> фєрогазу за теплотворною здатністю відповідає 36,412 млн. м<sup>3</sup> природного газу (109236 т). Виконані по розробленій моделі розрахунки показали, що за рахунок використання фєрогазу як енергоносія вдалося скоротити емісію CO<sub>2</sub> на 294,2 тис. т (294,2 тис. ERU) [15]. З урахуванням застосування фєрогазу при агломерації річна емісія CO<sub>2</sub> була знижена на 351,2 тис. ERU. Незважаючи на успіхи у використанні фєрогазу при агломерації аглошихти і суміжних процесах виробництва марганцевих феросплавів, значна його частина (550 млн. м<sup>3</sup>) поки не використовується. Перспективним є використання фєрогазу для генерації електричної енергії і тепла в когенераційній станції (рисунок 5).

<sup>3</sup> ERU (emission reduction units) – одиниця зменшення викидів, це одиниця, яка може передаватися в рамках механізму спільного впровадження (Joint implementation) Кіотського протоколу Кількісно дорівнює 1 тоні викидів парникових газів в еквіваленті CO<sub>2</sub> [16].



**Рисунок 5 - Розроблена схема використання ферогазу на АТ «НЗФ», що забезпечує його повне використання як енергоносія**

Виконані розрахунки дозволили визначити основні технологічні параметри проектованої когенераційної станції (таблиці 8).

**Таблиця 8. - Основні технологічні параметри, когенераційної станції, що проектується [17]**

Найменування показника	Величина показника
Встановлена електрична потужність, МВт	60
Розрахункові теплові навантаження	
• пара, т/год	70
• гаряча вода, ГДж/год	25,08
• опалення і вентиляція, ГДж/год	70,22
Річне виробництво тепла, тис. ГДж	2137
Річне виробництво електроенергії, млн. кВт·год	420
Витрати електроенергії на власні потреби, %	8
Річне постачання електроенергії, млн. кВт·год	386,4

Як видно з табл. 4.8, річна генерація електричної енергії складе 420 млн. кВт·год, також планується вироблення 2137 тис. ГДж тепла, що дозволить опалювати у зимовий період частину м. Нікополь.

Таким чином, спорудження проектованої когенераційної станції дозволить істотно поліпшити енергетичний баланс виробництва феросплавів в умовах АТ «НЗФ».





## **2.6. Оцінювання ефективності роботи систем газоочищення АТ «НЗФ» при виробництві марганцевих феросплавів на основі розробленої математичної моделі розсіювання аспіраційних пилогазових викидів**

Цікавим є науковий підхід до оцінювання ефективності природоохоронних заходів, зокрема ефективності газоочисних споруд, що впроваджуються, на основі математичного моделювання.

### **2.6.1 Аналіз методів моделювання розповсюдження пилогазових викидів від стаціонарних джерел з урахуванням умов феросплавного виробництва**

Процес поширення газових викидів включає в себе наступні складові: дифузний фактор, фактор вітрового навантаження (який відображає спрямоване переміщення газових викидів силою вітру; на відміну від дифузії, яка за відсутності інших причин створює симетричне в усіх напрямках поле концентрацій, вітрове навантаження розподілене нерівномірно як по напрямку, так і за часом); хімічний фактор (який характеризує інтенсивність впливу кожного компонента викидів з компонентами атмосфери). Відомі два підходи в математичному моделюванні процесу поширення забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери [18]. Перший з них заснований на вирішенні рівняння турбулентної дифузії і отримав розвиток в основному в державах СНД. Цей підхід дозволяє досліджувати завдання з джерелами пилогазових викидів різного типу (різними граничними умовами, характеристиками середовища). Чисельні рішення рівняння атмосферної дифузії з різними граничними умовами в подальшому були прийняті в якості основи інженерної моделі, виконаної в Головної геофізичної обсерваторії ім. А.І. Воєйкова і прийнятої в якості Російського громадського нормативного документа ОНД-86 [19].

Відповідно до методики ОНД-86 [19] ступінь забруднення атмосферного повітря викидами шкідливих речовин з безперервно діючих джерел визначається за найбільшою розрахованим значенням разової приземної концентрації шкідливих речовин ( $c_M$ ), яка встановлюється на деякій відстані ( $x_M$ ) від місця викиду при несприятливих метеорологічних умовах, коли швидкість вітру досягає небезпечного значення ( $V_M$ ) в приземному шарі відбувається інтенсивний турбулентний обмін. Згідно з цими методиками величини приземних концентрацій інгредієнтів по осі газового викиду підприємства оцінюються при тих же несприятливих метеорологічних умовах з урахуванням





емпіричного поправочний коефіцієнт, що залежить від величини відносини відстані, на якому визначається концентрація, до відстані, на якому досягається максимальна концентрація. Модель дозволяє розраховувати поле максимальних концентрацій домішки на рівні землі при викиді з одиночного джерела і групи джерел, при нагрітих і холодних викидах, а також дає можливість одночасно врахувати дію різнорідних джерел і розрахувати сумарне забруднення атмосфери від сукупності викидів стаціонарних і пересувних джерел [19].

При моделюванні процесу поширення викиду зроблено припущення, що при наявності вітру, що має швидкість  $u$  м/с уздовж даного напрямку, все речовина, яке надходить в атмосферу, повністю захоплюється вітром і несесться їм, тобто все кількість газового викиду протягом інтервалу часу, поки вітер направлений уздовж даного напрямку, рухається також уздовж нього. В [20] приведено вираз, що дозволяє визначити приземну концентрацію в будь-якій точці, розташованій з підвітряного боку від труби:

$$c = c_m \cdot S_1 \cdot S_2 = \frac{A \cdot M \cdot F_{mn\eta}}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \cdot \Delta T}} \cdot S_1 \cdot S_2, \quad (1)$$

$c_m$  - величина приземної концентрації в точці максимального забруднення повітря, розташованої на відстані  $x_m$ , мг/м<sup>2</sup>;  $S_1$  - безрозмірний коефіцієнт, що враховує зменшення приземної концентрації уздовж вітрової осі;  $A$  коефіцієнт, що залежить від температурної стратифікації атмосфери;  $M$  - маса викиду г/с;  $F$  - безрозмірний коефіцієнт осідання шкідливих домішок з газоповітряної суміші;  $m, n$  - коефіцієнти, що враховують умови виходу газів з труби;  $\eta$  - безрозмірний коефіцієнт, що враховує вплив рельєфу місцевості (у випадку рівної, або місцевості, що слабо перетинається з перепадом висот, що не перевищують 50 м на 1 км,  $\eta = 1$ );  $H$  - висота джерела над рівнем землі, м;  $V_1$  - обсяг газів (газоповітряної суміші), що надходять з джерела в атмосферу, м<sup>3</sup>/с;  $\Delta T$  - різниця температур газів, що поступають в атмосферу, і зовнішнього повітря;  $D$  - діаметр гирла труби, м;  $S_2$  - безрозмірний коефіцієнт зменшення приземної концентрації на відстані  $y$  від вітрової осі на лінії, що перпендикулярна до цієї осі. Цей коефіцієнт залежить від швидкості вітру і відношення  $y^2/x^2$  за аргументом  $t_y$ .

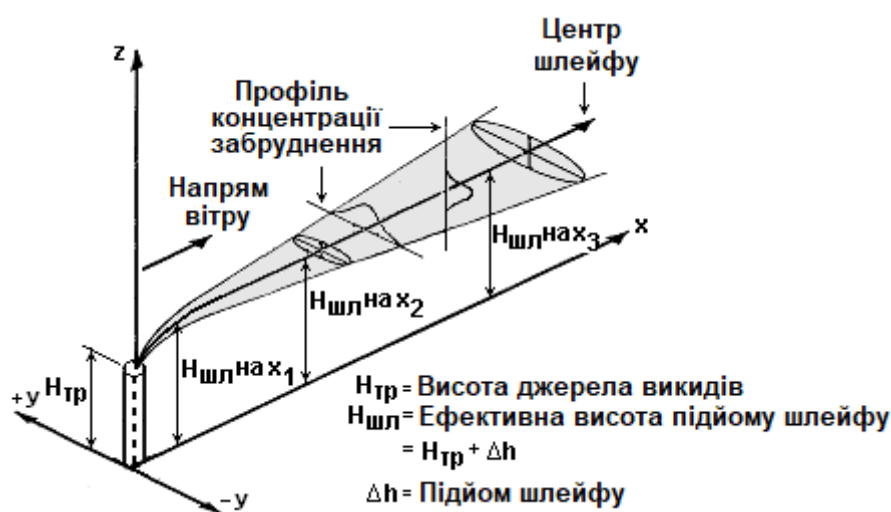
Другий підхід, який використовує емпірико-статистичний метод, в основному отримав розвиток в Європі і США. Відповідні йому математичні моделі називаються «гаусовими». Вони описуються щільністю розподілу Гауса. Ця методика рекомендована Агентством з охорони навколишнього середовища



США для проведення розрахунків, що носять нормативний характер. Перевагою методики Гауса є її порівняно висока точність при досить простій параметризації впливають на розсіювання домішок факторів, а також можливість підстроювання емпіричних параметрів з урахуванням специфіки конкретного джерела пилогазових викидів [18]. Однак, застосування цього методу на місцевості, що сильно перетинається, дає великі похибки. При використанні моделі Гауса концентрація забруднень, що викидаються з точкового джерела, описується рівнянням (2) [21].

$$c(x, y, z) = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot u_{\text{шл}} \cdot \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot \exp\left(-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_y^2(x)}\right) \cdot \left\{ \exp\left(-\frac{(z - H_{\text{шл}})^2}{2 \cdot \sigma_z^2(x)}\right) + \exp\left(-\frac{(z + H_{\text{шл}})^2}{2 \cdot \sigma_z^2(x)}\right) \right\} \quad (2)$$

де  $c(x, y, z)$  – концентрація речовини, що викидається в точці з координатами  $x, y, z$ , мг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – потужність безперервного джерела, мг/с;  $u_{\text{шл}}$  – швидкість вітру на висоті  $H_{\text{шл}}$ , м/с;  $x$  – відстань від джерела, м;  $y$  – поперечна відстань від осі шлейфу, м;  $z$  – висота над поверхнею землі, м;  $H_{\text{шл}}$  – кінцеве піднімання шлейфу над землею (ефективна висота підйому шлейфу), м;  $\sigma_y(x), \sigma_z(x)$ , - стандартні відхилення розсіювання по осях  $y, z$ .



**Рисунок 6 - Розповсюдження газових викидів від точкового джерела: [20]**

З урахуванням того, що район, прилеглий до АТ «Нікопольський завод феросплавів», знаходиться на рівнинній місцевості, оцінку поширення забруднюючих речовин в приземному шарі атмосфери виконували по моделі Гауса. Концентрація забруднень, що викидаються з точкового джерела, описується рівнянням (2). У рівнянні (2) приймається допущення, що напрямок вітру збігається з напрямком осі ОХ, а початок координат знаходиться в підставі



джерела (труби) (рисунок 6).

Існує кілька окремих випадків моделей Гауса, які відрізняються між собою способами функціонального опису,. Однією з найбільш поширених моделей є модель Пасквілла- Гіффорда, яка застосовується для оцінки забруднень в радіусі 10 км від джерела викидів [21]. Значення стандартних відхилень , залежать від шести класів стійкості атмосфери А-Ф - класів Пасквілла, які дозволяють враховувати різні метеорологічні умови [22].

**Рисунок 9 - Класи стійкості атмосфери за Пасквіллом: [22]**

Швидкість вітру, м/с	Класи стійкості атмосфери А до F				
	Денний час			Нічний час	
	Рівень сонячного освітлення			Хмарність	
	Сильний	Середній	Слабкий	> 50%	< 50%
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	E	F
3-5	B	B-C	C	D	E
5-6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Пасквіллом та Гіффордом [19] запропоновані наступні рівняння для визначення  $\sigma_y(x)$ ,  $\sigma_z(x)$ :

$$\sigma_y = 456,12 \cdot x \cdot \tan\{0.0175 \cdot [n - d \cdot \ln(x)]\} \quad (3)$$

$$\sigma_z = a \cdot x^b \quad (4)$$

$a$ ,  $b$ ,  $n$ ,  $d$  – емпіричні коефіцієнти, які залежать від класів стійкості атмосфери [21] (таблиця 10 і таблиця 11).

Швидкість вітру на ефективній висоті (тобто  $H_{\text{шл}}$ ) джерела викидів  $u_{H_{\text{шл}}}$  розраховується з виразу:

$$u_{H_{\text{шл}}} = u \cdot \left( \frac{H_{\text{тр}}}{h_z} \right)^p \quad (5)$$

де  $H_{\text{тр}}$  - висота джерела викидів, м;  $h_z$  - висота виміру приземної швидкості повітря (як правило 10 м);  $p$  – емпіричний коефіцієнт, що залежить від класів стійкості атмосфери і типу місцевості [21].

Таблиця 10 - Залежність параметрів  $n$ ,  $d$  від класів стійкості атмосфери: [22]

Класи стійкості Пасквілла	Емпіричні коефіцієнти	
	$n$	$d$
A	24,167	2,533
B	18,333	1,810
C	12,500	1,086
D	8,333	0,724
E	6,250	0,543
F	4,167	0,362

Таблиця 11 - Залежність параметрів  $a$ ,  $b$  від класів стійкості атмосфери: [22]

Класи стійкості Пасквіла	Відстань від джерела викиду $x$ (км)	Емпіричні коефіцієнти	
		$a$	$b$
A	<0,10	122,80	0,945
	0,10 – 0,15	158,08	1,054
	0,16 – 0,20	170,22	1,093
	0,21 – 0,25	179,52	1,126
	0,26 – 0,30	217,41	1,264
	0,31 – 0,40	258,89	1,409
	0,41 – 0,50	346,75	1,728
	>0,51	453,85	2,117
B	<0,20	90,673	0,932
	0,21 – 0,40	98,483	0,983
	>0,40	109,300	1,097
C	Всі відстані	61,141	0,915
D	<0,30	34,459	0,870
	0,31 – 1,00	32,093	0,811
	1,01 – 3,00	32,093	0,644
	3,01 – 10,00	33,504	0,605
	10,01 – 30,00	36,650	0,566
	>30,00	44,053	0,512
E	<0,10	24,260	0,837
	0,10 – 0,30	23,331	0,820
	0,31 – 1,00	21,628	0,757
	1,01 – 2,00	21,628	0,631
	2,01 – 4,00	22,534	0,572
	4,01 – 10,00	24,703	0,505
	10,01 – 20,00	26,970	0,467
	20,01 – 40,00	35,420	0,376
	>40,00	47,618	0,300



Класи стійкості Пасквіла	Відстань від джерела викиду $x$ (км)	Емпіричні коефіцієнти	
		$a$	$b$
F	<0,20	15,209	0,816
	0,21 – 0,70	14,457	0,784
	0,71 – 1,00	13,953	0,686
	1,01 – 2,00	13,953	0,632
	2,01 – 3,00	14,823	0,545
	3,01 – 7,00	16,187	0,465
	7,01 – 15,00	17,836	0,415
	15,01 – 30,00	22,651	0,327
	30,01 – 60,00	27,074	0,274
>60,00	34,219	0,217	

**Таблиця 12 - Залежність коефіцієнту  $p$  від класів стійкості атмосфери і типу місцевості [20]**

Класи стійкості Пасквіла	$p$ – для сільської місцевості	$p$ – для міської місцевості
A	0,07	0,15
B	0,07	0,15
C	0,10	0,20
D	0,15	0,25
E	0,35	0,30
F	0,55	0,30

Ефективна висота підйому шлейфу  $H_{шл}$  над землею залежить від класів стійкості атмосфери А-F та відстані від джерела викидів. Для класів стійкості А- D цей параметр визначається так:

$$H_{шл} = H' + 1,6 \cdot \frac{F_b^{1/3} \cdot x_{\max}^{1/3}}{u_{Hшл}} \text{ при } x < x_{\max} \quad (6)$$

$$H_{шл} = H' + 1,6 \cdot \frac{F_b^{1/3} \cdot x^{1/3}}{u_{Hшл}} \text{ при } x \geq x_{\max}$$

де  $H'$  - модифікована висота джерела викидів, м;  $F_b$  - параметр Брігса;  $x_{\max}$  - відстань де досягається максимальна концентрація, м.

$$F_b = g \cdot \omega_0 \cdot D^2 \cdot \left( \frac{T_s - T_a}{4 \cdot T_s} \right), \quad (7)$$

де  $g$  - прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\omega_0$  - швидкість виходу газів з



джерела викидів, м/с;  $D$  - діаметр гирла джерела викидів, м;  $T_s$  - температура газів, що викидаються в атмосферу, °С;  $T_a$  - температура оточуючого повітря, °С.

Модифікована висота джерела викидів залежить від швидкості вітру на ефективній висоті джерела викидів і швидкості витікання газів з труби

$$H' = H + 2 \cdot D \cdot \left( \frac{\omega_0}{u_{H_{шл}}} - 1,5 \right) \text{ якщо } \omega_0 < 1,5 \cdot u_{H_{шл}} \quad (8)$$

$$H' = H \text{ в інших випадках}$$

Знаючи значення параметра Бріггса можна також визначити відстань від джерела викидів, на якому досягається максимальна концентрація шкідливої речовини.

$$x_{\max} = 49 \cdot F_b^{5/8} \text{ якщо } F_b < 55 \quad (9)$$

$$x_{\max} = 119 \cdot F_b^{2/5} \text{ якщо } F_b \geq 55$$

Якщо  $1,84 \cdot u_{H_{шл}} \geq x_{\max}$  методика розрахунку  $H_{шл}$  для класів стійкості E, F проводиться, як описано вище для класів A-D. У разі невиконання умови ефективна висота джерела визначається з виразу

$$H_{шл} = H' + 2,4 \cdot \left( \frac{F_b}{u_{H_{шл}} \cdot s} \right)^{1/3} \quad (10)$$

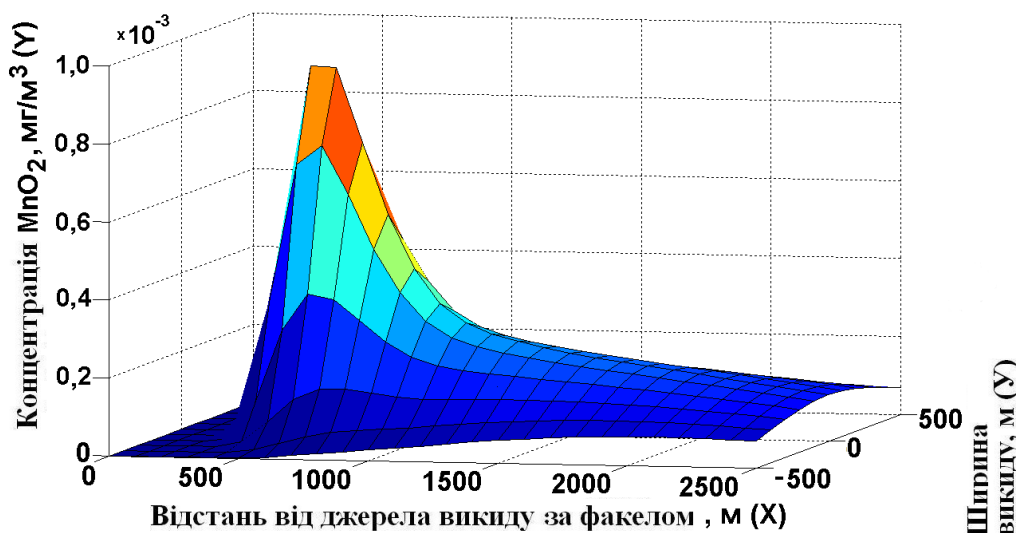
де  $s$  - коефіцієнт стабільності

$$s = g \cdot \frac{\partial \Theta / \partial z}{T_a} \quad (11)$$

За даними [23]  $\partial \Theta / \partial z$  для класу стабільності E дорівнює 0,02 К/м, для F - 0,035 К/м.

### 2.6.2 Моделювання та аналіз результатів

На основі виразів 2-11 та даних таблиць 9-12 виконано моделювання розповсюдження пилогазових викидів в умовах цеху виплавки феросплавів АТ «НЗФ». В якості прикладу наведені поля приземних концентрацій оксидів марганцю (в перерахунку на  $MnO_2$ ), що утворюється при пилогазових викидах з труби висотою 60 метрів від печі РПЗ-48 (рисунок 7).



**Рисунок 7 - Зміна приземної концентрації з'єднань марганцю (в перерахунку на MnO<sub>2</sub>) при викидах з труби висотою 60 м, діаметром 4 м і наступних початкових умовах: Q – 0,69 г/с; – 11,03 м/с; u – 2 м/с, T<sub>s</sub> – 49°C; T<sub>a</sub> – 20°C (день, ясна погода)**

Результати розрахунків добре узгоджуються з даними стаціонарних постів спостереження, розташованих на відстані 500-3000 м від джерела викидів. За допомогою чисельного моделювання встановлено, що концентрація з'єднань марганцю в зоні впливу цеху виплавки феросплавів не перевищує ГДК 0,001 мг/м<sup>3</sup>. Максимальна приземна концентрація цих сполук на відстані 500 м від джерел пилогазових викидів становить 0,00085 мг/м<sup>3</sup> (0,85 середньодобової ГДК). При більшій відстані від таких джерел (на відстань 2,5 км) концентрація з'єднань марганцю знижується до 0,0001 мг/м<sup>3</sup> (0,1 середньодобової ГДК). Виходячи з даних розрахунків, можна зробити висновок, що після установки ГАС-5, кількість викидів шкідливих домішок значно скоротилося. Це дозволяє зробити висновок щодо ефективності використання даної системи газоочищення.

Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати поширення твердих і газоподібних компонентів викидів в залежності від метеорологічних умов і оцінювати ефективність природоохоронних заходів щодо зниження техногенного навантаження на навколишнє природне середовище.





## Висновки

У даній роботі розглянуті питання та приклади реалізації стратегії сталого розвитку на найпотужнішому підприємстві феросплавного комплексу України АТ «Нікопольський завод феросплавів». Продемонстровано системний підхід до вирішення завдань сталого розвитку на цьому підприємстві. Виконано комплексний аналіз основних факторів, що негативно впливають на навколишнє середовище при агломерації марганцевих руд і подальшій виплавці марганцевих феросплавів.

Дана загальна характеристика пилогазових викидів при виробництві марганцевих феросплавів. Показано, що газоподібні викиди складають 94%, а тверді – 6%. В якості прикладу реалізації стратегії зі скорочення обсягу викидів на АТ «НЗФ» розглянуто проект з впровадження сучасної вітчизняної системи очищення газів - газоаспіраційної станції ГАС-5 (конструкції УкрГНТЦ «Енергосталь») потужністю 500000 м<sup>3</sup>/г з рукавним фільтром з імпульсною регенерацією ФРІР-7000.

Для оцінювання обсягів діоксиду вуглецю, що викидається у повітря при виробництві феросилікомарганцю і високовуглецевого феромарганцю, науковцями кафедри електрометалургії Національної металургійної академії України спільно з представниками АТ «НЗФ» виконано математичне оцінювання емісії CO<sub>2</sub> при агломерації марганцеворудної сировини і при виплавці марганцевих феросплавів. Розрахунками встановлено, що застосування ферогазу замість природного газу для запалювання палива при агломерації дозволяє знизити емісію CO<sub>2</sub> при виробництві ФМн78 на 24-31 кг / т (1,4-1,7%), а при виробництві МнС17 на 19-26 кг / т ( 1,1-1,4%). Отримана математична модель дозволяє оцінювати обсяг емісії CO<sub>2</sub> і ефективність прийнятих технологічних рішень по скороченню викидів парникових газів та підвищення енергоефективності виробництва. Розглянуті питання скорочення емісії діоксиду вуглецю за рахунок використання ферогазу в якості енергоносія.

На основі моделі розсіювання Гауса виконане чисельне математичне моделювання процесу поширення пилогазових викидів. Розроблена математична модель дозволяє прогнозувати поширення твердих і газоподібних компонентів викидів в залежності від метеорологічних умов і оцінювати ефективність природоохоронних заходів щодо зниження техногенного навантаження на навколишнє природне середовище. Показано, що реалізований комплекс заходів щодо впровадження сучасних пилогазоочисних систем, зменшення емісії CO<sub>2</sub> та



інші заходи зі сталого екологічного розвитку, що впроваджуються на АТ «Нікопольський завод феросплавів», дозволили значно поліпшити екологічну обстановку у регіоні.

З урахуванням поступової гармонізації природоохоронного законодавства України до нормативів ЄС рекомендується продовжити удосконалення систем газоочищення підприємства та подальше впровадження природоохоронних програм.