

DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.2

УДК 669.184

**Кащєєв М.А.**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-0938-4384, e-mail: pmz@pmz.dp.ua

**Манзенко С.В.**<sup>2</sup>, директор, e-mail: pmz@pmz.dp.ua

**Руденко М.Р.**<sup>1</sup>, к.т.н. ORCID: 0000-0002-8016-5221, e-mail: 18rudenko@gmail.com

**Квашин В.А.**<sup>2</sup>, технолог, e-mail: pmz@pmz.dp.ua

**Руденко Р.М.**<sup>1</sup>, здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0008-6207-0107, e-mail: 93rudenko@gmail.com

<sup>1</sup>Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

<sup>2</sup>Товариство з обмеженою відповідальністю Конструкторське бюро «ВAB», м. Кам'янське

**Kashcheev Mikhail**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy

**Manzenko Serhij**<sup>2</sup>, director

**Rudenko Mykola**<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of the Department of Metallurgy

**Kvashin Volodymyr**<sup>2</sup>, technologist

**Rudenko Rodion**<sup>1</sup>, postgraduate student

<sup>1</sup>Dniprovsky State Technical University, Kamianske

<sup>2</sup>«VAV» Design Bureau Limited Company, Kamianske

## КОМПЛЕКСНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЧИСТКИ АГЛОМЕРАЦІЙНИХ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ ТА ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ З ОТРИМАННЯМ НА ВИХОДІ ТОВАРНОЇ ПРОДУКЦІЇ

*У статті представлена удосконалена конструкція пиловловлюючого апарату агломераційної машини, яка дозволяє підвищити ефективність вловлювання заряджених частинок пилу у ламінарних шарах поблизу осаджувальних елементів. Запропоновано конфігурацію та розташування осаджувальних елементів, встановлено залежність ефективної (розрахункової) швидкості дрейфу заряджених дисперсних частинок від швидкості середовища, що очищається, при класичному процесі електрогазоочищення та комбінованому ході газів в електрофільтрах.*

**Ключові слова:** агломашина; пил; газ; очищення; турбулентний; ламінарний потік; осаджувальні елементи; електроапарат; ефективність.

*The article presents an improved design of the dust-collecting device of the sintering machine, which allows to increase the efficiency of capturing charged dust particles in laminar layers near the settling elements. The configuration and location of the settling elements is proposed, the dependence of the effective (calculated) drift speed of charged dispersed particles on the speed of the medium being cleaned is established. with the classic process of electrogas purification and the combined flow of gases in electrofilters.*

**Keywords:** sintering machine; dust; gas; cleaning; turbulent; laminar flow; depository elements; electrical apparatus; efficiency.

### Постановка проблеми

Виробництво залізородного агломерату супроводжується утворенням великих об'ємів запиленних газів. Технологічні гази (організовані викиди) утворюються під час спікання шихти на агломашині. Ці гази відводяться з-під аглострічки крізь вакуум-камери, колектор, пиловловлюючу установку, з якої відсмоктуються екстаустером і крізь димову трубу викидаються в атмосферу.

В середньому від агломераційних машин конвеєрного типу утворюється до 0,3—2,0 млн.т аглогазів з температурою до 120—180 °С. Вміст твердих суспендованих частинок в залежності від конструкції агломашини і технології досягає до 8 г/н.м<sup>3</sup> [1, 2].

Зниження вмісту пилу в газах призводить до покращення умов праці, підвищення терміну роботи ексгаустерів і покращення екологічного стану регіону [3, 4].

Для нашої агломерації характерні деякі особливості технологічних процесів, що тягнуть за собою дуже великі викиди пилу і газів в атмосферу, на відміну від аналогічних закордонних аглофабрик [1, 4], де спікають багаті залізні руди, а не концентрати [2]. Пил, що при цьому утворюється, втричі крупніше та його втричі менше. Вміст класу менше 200 мкм більше 50 %, при цьому організувати очищення газів простіше й легше.

Шихта для агломераційних машин типу АКМ-75 містить у рудній частині велику масову частку (60—85 %) тонкодисперсних залізородних концентратів та зворотної фракції агломерату (до 20 %), що ускладнюють процеси їх підготовки та спікання, операції складування та усереднення шихтових матеріалів, нерідко із вапнуванням, виконують на відкритих складах без засобів пиловидалення [3]. Недостатня газопроникність шихти, низька герметичність газових пиловловлювачів агломашин змушують вести спікання у шарах малої висоти (до 250—380 мм), що призводить до збільшення пиловиносу. При цьому пил достатньо дрібний, вміст класу менше 63 мкм більше 50 % [5].

Проблема ефективного вловлювання твердих або рідких частинок під час очищення технологічних газів в останні роки стає дуже актуальною, через те, що ступінь вловлювання традиційними електрофільтрами, які використовуються, через непереборні недоліки знаходиться на дуже низькому рівні — близько 95 % [6], що врешті решт призводить до перевищення встановлених європейських норм викидів у різних галузях промисловості: енергетиці, чорній та кольоровій металургії, виробництві будівельних матеріалів, хімічній та нафтохімічній промисловості.

До одного із резервів покращення техніко-економічних показників роботи системи очищення електрофільтрів можна віднести зниження газодинамічного опору колосникових ґрат за рахунок удосконалення конструкції та підвищення ефективності вловлювання заряджених частинок пилу у ламінарних шарах поблизу осаджувальних елементів.

#### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

В електрофільтрах [7, 8] що використовуються, реалізується класичний процес електрогазоочищення, при якому заряджені часточки видаляються з газової фази шляхом вловлювання у приграничних ламінарних прошарках поблизу поверхні осаджувальних електродів. Очищення газової складової внаслідок переміщення заряджених часток та іншого міжелектродного простору відбувається під дією сильного електричного поля та за рахунок втягування частинок пульсаціями турбулентного газового потоку. Ефективність класичних електрофільтрів розраховується, зазвичай, у вигляді [9]:

$$\eta = 1 - \exp^x(-w\kappa L/vd), \quad (1)$$

де  $\eta$  — ефективність;  $w$  — швидкість дрейфу заряджених часток, м/с;  $\kappa$  — коефіцієнт неоднорідного розподілу, що відображує зміщення часток золи у ламінарні прошарки;  $L$  — довжина робочих полів електрофільтра, м;  $v$  — швидкість димових газів у проміжку між осаджувальними та коронуючими електродами, м/с;  $d$  — відстань між осаджувальними та коронуючими електродами, м.

Технічно та екологічно найбільш перспективним рішенням проблеми ефективного видалення пилу є застосування в електрофільтрах інтенсивної електронно-іонної технології з комбінованим рухом газів [10, 11]. Основні фізичні принципи технології електроочищення з комбінованим ходом газів полягають у наступному:

- забезпечення зарядження всієї сукупності часток пилу до граничних величин шляхом організації високотурбулізованого потоку та перебування частинок пилу в зонах з найбільшою напруженістю у чохлах коронарного розряду;
- використання аеродинамічних сил газового напору для примусового переміщення всіх заряджених частинок вічка, що вловлюють газопроникних осаджувальних електродів;
- ефективно вловлювання заряджених частинок пилу у ламінованих шарах поблизу осаджувальних елементів.

Інтенсивна електронно-іонна технологія з комбінованим ходом газів при реалізації в електрофільтрах забезпечує наступні переваги:

- забезпечення європейських норм викидів в атмосферне повітря міст;
- металоемність та питомі енергетичні витрати на електроочищення мають найменші величини;
- конструкція активних елементів гарантує сприятливий для енергетики час напруження на відмови, які усуваються без застосування спеціальної техніки.

#### Формулювання мети дослідження

Встановлення фізичного механізму технології електрогазоочищення з комбінованим ходом газів з можливістю виділення та очищення до 400 тис. м<sup>3</sup>/год при концентрації забруднених газів від 0 до 6 г/м<sup>3</sup> твердих пилоподібних частинок. Розробка конфігурації та розташування елементів осаджувача. Встановлені залежності ефективної (розрахункової) швидкості дрейфу заряджених дисперсних частинок від швидкості середовища, що очищається, при класичному процесі електрогазоочищення та комбінованому ході газів в електрофільтрах.

#### Виклад основного матеріалу

З наведеного виразу видно, що традиційні підходи до рішення проблеми ефективного пиловловлювання шляхом зниження швидкості димових газів в електрофільтрах змінюють можливість того, що всі часточки пилу можуть опинитися у ламінарних прошарках та будуть у них вловлені, особливо їх високодисперсні фракції. Хоча з іншого боку, високотурбулізований газовий потік призводить до зриву вже вловлених часток пилу та їх агломератів з поверхні осаджувальних електродів. Одночасно підвищенні швидкості до 2...3 м/с скорочують час перебування у активних проміжках до 4...5 с.

Основний вклад у ефективність електрофільтру вносить все ж коефіцієнт неоднорідності розподілу концентрації пилу у газі та, відповідно, швидкість дрейфу заряджених частинок, яка визначається [10]

$$w = qE_{oc}(1 + A_k I_m / r_\phi) / 6\pi\mu r_\phi k_\phi, \quad (2)$$

де  $q$  — заряд набутий частинкою, Кл;  $E_{oc}$  — напруженість електричного поля у поверхні осаджувальних електродів, В/м;  $A_k$  — стала, що характеризує властивості поверхні частинки;  $I_m$  — вільна довжина перебігу дисперсних частинок, м;  $r_\phi$  — радіус еквівалентної сфери частинки, м;  $k_\phi$  — коефіцієнт форми еквівалентної сфери частинки;  $\mu$  — в'язкість газової фази, м<sup>2</sup>/с.

Як видно, головними критеріями збільшення швидкості дрейфу частинок пилу є заряд та напруженість електричного поля у поверхні осаджувальних електродів. Для ефективності видалення частинок пилу необхідно підтримувати різко неоднорідне поле та забезпечити стійкі електронно-іонні процеси в чохлах коронарного розряду, які зосереджені у вузькій області поблизу розрядних виступів елементів, що коронують. Проте, штаповані голки у стрічково-гольчатих елементах, що коронують, які отримали широке застосування, через 1—2 роки експлуатації перетворюються, через електроерозію, в овальні виступи. Спрацьовані розрядні виступи виключають формування різко неоднорідного сильного електричного поля та не забезпечують достатню для електроосаджування пилу щільність коронарного розряду 0,2...0,5 мА/м<sup>2</sup> поверхні, що осаджує.

Крім того, запропоновані ефективні умови зарядження та вловлювання частинок пилу у сильному електричному полі мають забезпечуватися агрегатами живлення, робота яких орієнтована на підтримання в автоматичному режимі визначеної частоти іскрових розрядів (50...250 іскор/хвилину при напрузі 40—50 кВ). При цьому параметром автоматичного регулювання є сигнал зворотного зв'язку по току навантаження, оскільки всі елементи регулятора розраховані на оптимальні токи у живлючих полях електрофільтра. Проектні токи мають становити не менше 50...100 % від оговореного номінального навантаження агрегату живлення встановленого типорозміру. Оскільки й схема захисту електроживлення розрахована на теж навантаження, ручний режим електроживлення сучасними агрегатами не допускається. У процесі експлуатації вище згадане електроерозійне руйнування виступів, що коронують та заростання осаджувальних електродів пиловими відкладеннями, що не отряхуються, призводять до різкого падіння токового навантаження — не менше 30 % номінальної величини навантаження агрегату живлення. За цих умов автоматичний режим агрегату живлення намагається вивести проектні показники за рахунок дугових розрядів. Експлуатація електрофільтра в таких умовах призводить до постійного перенапруження у високовольтному ланцюгу електроживлення та до виходу з ладу окремих його

елементів. Ручний режим не дозволяє надійно управляти силовими тиристорами, а у низьковольтному первинному ланцюгу спостерігаються відмови навіть силових тиристорів. Таким чином, нестабільності та кидки в електроживленні призводять до неоправданого завищення споживаної електроенергії та подальшого зниження експлуатаційної ефективності електрофільтрів.

Для технологічної схеми використовувалась програма Solid Works. Для визначення основних параметрів та ефективності — прями промислові інструментальні замірювання. Основні етапи моделювання:

1. Вибір компонентів.
2. Вибір параметрів аеродинаміки для основних блоків очисного пристрою.
3. Розрахунок параметрів газоочисного апарату.
4. Створення технологічної схеми.
5. Збирання результатів із середовища, що моделюється.
6. Моделювання траєкторій запилених газових потоків в системі пилоосадження інерційного апарату.

Особливістю металургійного виробництва є утворення значної кількості забруднених газів. З метою встановлення фізичного механізму технології електрогазоочищення з комбінованим ходом газів у роботі моделювалась можливість виділення та очищення до 400 тис. м<sup>3</sup>/год забруднених газів від 0 до 6 г/м<sup>3</sup> твердих пилоподібних частинок.

Особлива увага при моделюванні приділялася процесу осадження. Була створена модель камери блоку осадження, що являла собою пилову камеру із розміщеним всередині газопроникним осаджувачем, виготовленим з профільних елементів, і бункером для осадження пилу.

Конфігурація та взаємне розташування елементів дозволяло спрямовувати потік по складній траєкторії між елементами осаджувача (рис. 1).

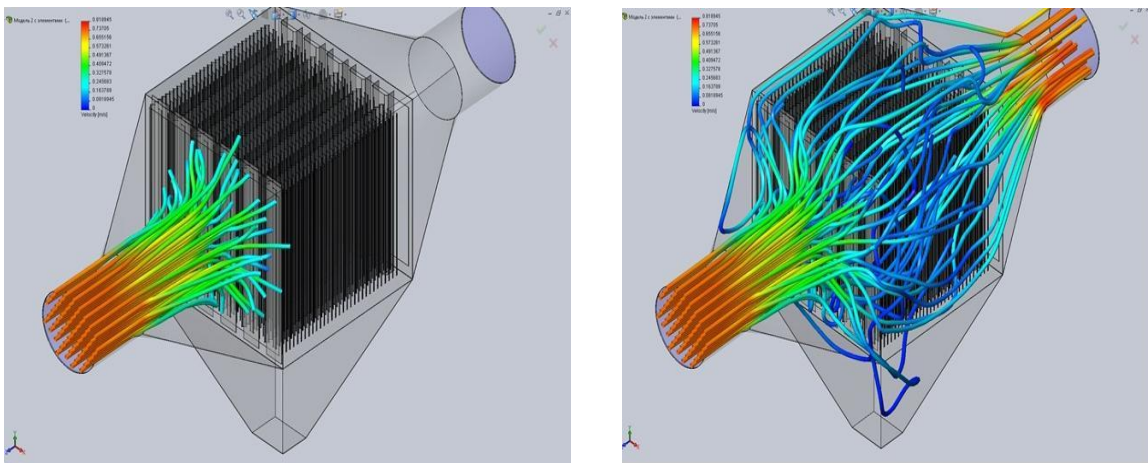


Рис. 1. Моделювання траєкторій та швидкостей запилених газових потоків у системі осадження пилу на різних етапах руху

Промисловими дослідженнями встановлені залежності ефективної (розрахункової) швидкості дрейфу заряджених дисперсних частинок від швидкості середовища, що очищається, при класичному процесі електрогазоочищення та комбінованому ході газів в електрофільтрах [12—14] (рис. 2).

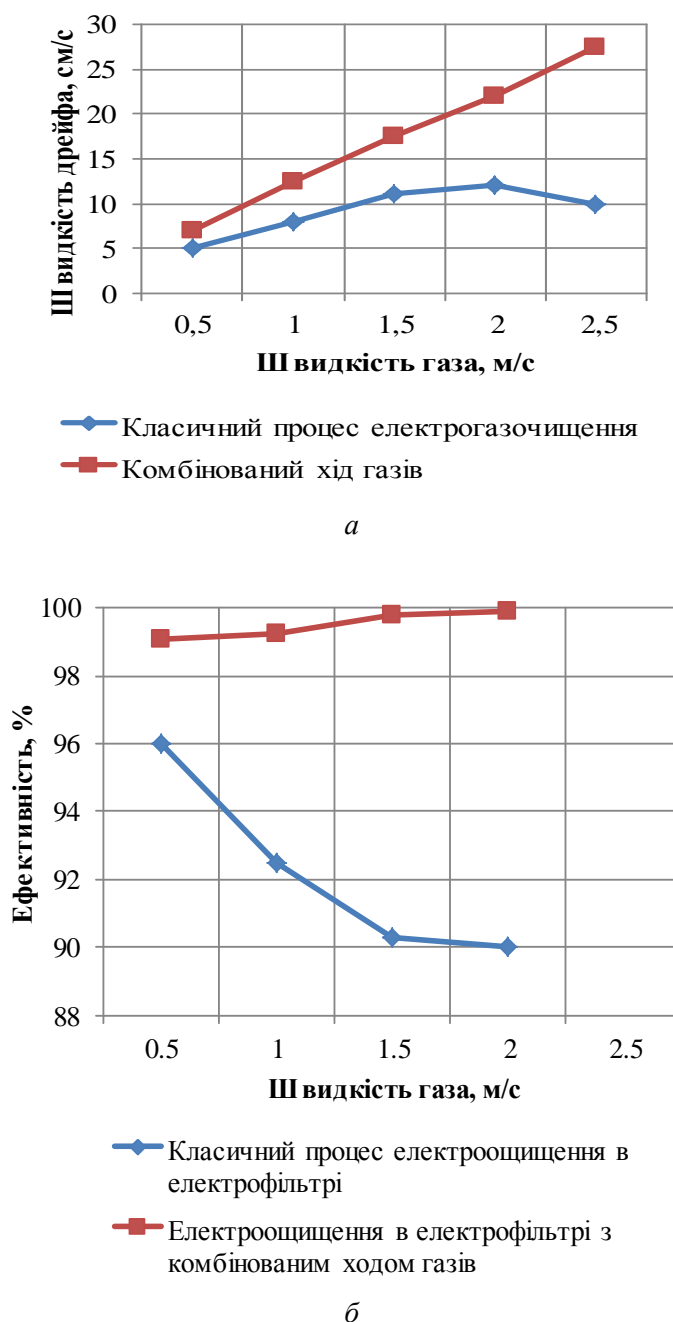


Рис. 2. Залежності ефективності: швидкості дрейфу заряджених дисперсних частинок (а) та електрофільтрів від швидкості середовища в них (б)

Встановлено, що у електрофільтрі класичного процесу електрогазоочищення збільшення швидкості з 0,5—1,5 м/с дрейф заряджених частинок інтенсифікується з 5 до 12 см/с. Проте, подальше збільшення швидкості знижує швидкість дрейфу заряджених частинок (рис. 2, а). Інтенсивна електронно-іонна технологія з комбінованим ходом газів забезпечує зростання швидкості дрейфу заряджених частинок до 22 см/с.

Дані комплексного дослідження також показують, що зі збільшенням швидкості середовища, що очищується, в електрофільтрі, ефективність його вловлювання дисперсних частинок за класичним процесом електроочищення суттєво знижується, а при реалізації комбінованого ходу газів в міжелектродних проміжках — зростає (рис. 2, б). Проте, при реалізації в елек-

трофільтрах комбінованого ходу газів, осаджувальні пруткові елементи мають ряд недоліків: їх циліндрична поверхня не створює умови ламінарного руху й активного осадження заряджених частинок поблизу поверхні що осаджує. Пруткові елементи, що осаджують не мають розвинених зон аеродинамічної тіні.

Розробка оптимальної, з точки зору формування ламінарного руху середовища, що очищується, конструкції осаджувальних електродів можлива тільки шляхом встановлення механізму електроочищення з комбінованим ходом газів. Для цього створено стенди електроочищення, у складі яких розроблені та застосовані:

- моделі електрогазоочищення;
- мікродозатор та вузол диспергування промислового пилу на первинні частинки;
- методика та апаратура термоанемометричного дослідження спектру швидкостей у міжелектродних просторах [7, 8].
- методика та апаратура вимірів траєкторій руху дисперсних частинок.

В результаті експериментальних досліджень встановлено механізм впливу аеродинамічних сил газового напору на швидкість дрейфу заряджених частинок з комбінованим ходом газів. Зміна напрямку руху та збільшення величини поперечного зсуву призводить до різкого зростання реального часу перебування заряджених частинок в вічках що вловлюють [10]. Вивчені спектри швидкостей середовища, що очищується, дозволяють розробити конструкції осаджувальних елементів із розвинутою поверхнею осадження дисперсних частинок. Найбільш оптимальною є конструкція осаджувальних елементів у вигляді плоскої грані із крайовими загинами у формі окружностей, не замкнутою на  $85...95^\circ$ , а відношення плоскої грані до радіусу крайових загинів становить  $2...7$  залежно від електрофізичних властивостей частинок, що вловлюються [11].

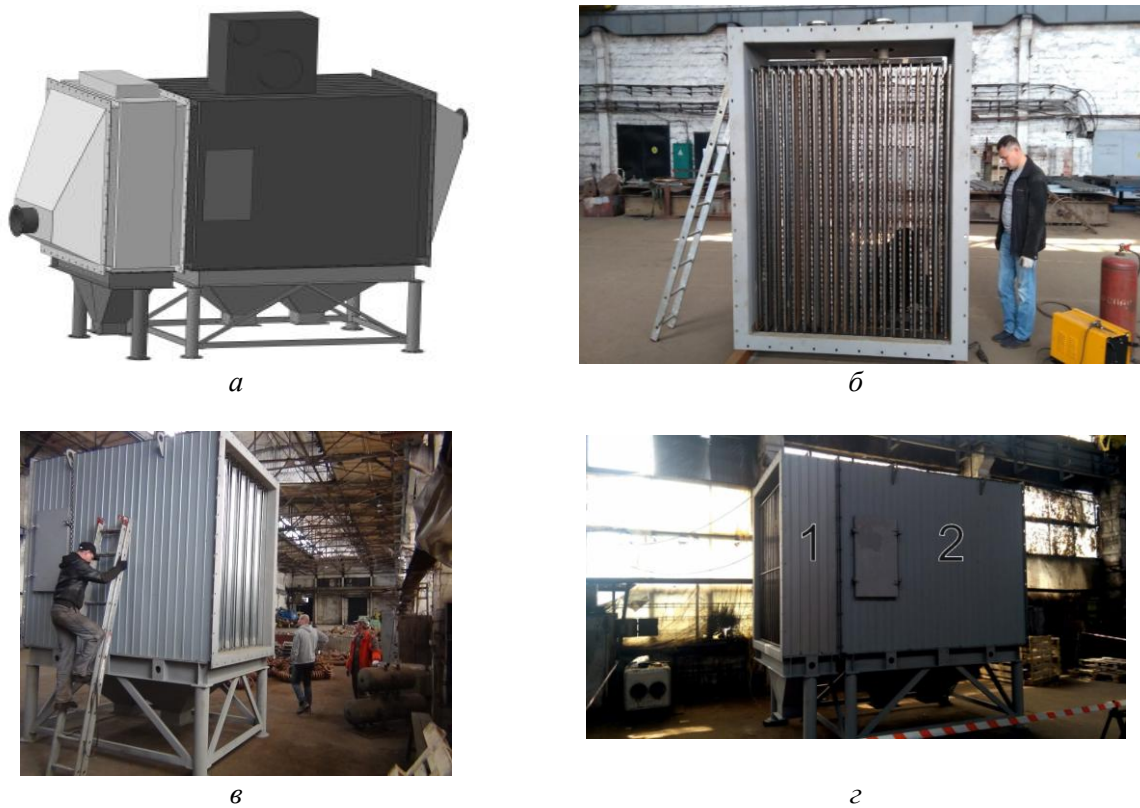
В електрофільтрах з комбінованим ходом газів нового покоління профільовані елементи широкою стороною встановлюють у ярусі осаджувального електроду під визначеними кутами, за яких живий перетин перфорованого осаджувального електроду становить  $65...85\%$ . Перемищуючись вздовж поверхні осаджувальних електродів, турбулентний газовий потік змінює напрям та розбивається на окремі струмені. За рахунок різкого збільшення (більше ніж у 10 разів) площі розтікання газові струмені мають значно меншу швидкість, ніж ядро основного потоку. Таке розтікання справляє сприятливий вплив на процес уловлювання заряджених дисперсних частинок, а також виключає вторинне їх винесення. В вічках, що вловлюють між сусідніми елементами, що осаджують, забезпечуються умови ламінарного обтікання їх поверхні газовими струменями. При цьому заряджені дисперсні частинки потрапляють у зони аеродинамічної тіні, утворені крайовими загинами і не піддаються прямому впливу газових струменів [11, 12]. У сукупності ефективність уловлювання заряджених дисперсних частинок під впливом кулонівських сил електричного поля в електрофільтрах з комбінованим ходом газів визначається:

$$\eta = 1 - [\exp(-w_{\text{кхг}}L/vd)] (w_{\text{кхг}}L_e/v_e d_e), \quad (3)$$

де  $w_{\text{кхг}}$  — швидкість дрейфу заряджених частинок при комбінованому ході газів, м/с;  $L_e$ ,  $d_e$  — відповідно ширина та крок встановлювання профільованих осаджувальних електродів, м;  $v_e$  — швидкість газових струменів в вічках, що вловлюють, м/с.

Одночасно за результатами досліджень спектрів швидкостей газового середовища у моделях нових електрофільтрів визначено оптимальні живі перетини аеродинамічних перегородок для забезпечення сприятливих умов зарядження зважених частинок та рівномірної роздачі потоку, що очищується, по вічкам що осаджують [12].

В результаті досліджень і аналізу недоліків розроблено проект електроапарату модульного типу «MV-2» (рис. 3, а [15]. Це дозволяє комбінувати модулі для зниження кількості пилу в газах що відходять в атмосферу в залежності від гранулометричного складу та концентрації.



*Рис. 3.* Система тонкого очищення запилених газів: *а* — апарат модульний тонкого очищення газів електронно-іонної технології; *б* — блок комбінованої електронно-іонної технології очищення газів (блок зарядки); *в* — блок перетворення та управління каскадною енергією (блок осадження); *г* — комбінована компоновка газоочисного пристрою «MV-2-30»; 1 — блок зарядки; 2 — блок інерційного осадження

Основною перевагою є поділення конструкції апарату «MV-2», на окремі модулі, що дозволяє

- значно зменшити габарити без зміни параметрів очищення;
- ефективно об'єднувати в одному корпусі ГОУ (газоочищувальна установка) послідовно розташовані модульні блоки різної технології очищення газів, крізь які проходять димові гази послідовно очищуються від дисперсних частинок та шкідливих газоподібних, таких як CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>;
- забезпечити очищення промислових та аспіраційних викидів (газів, пилу та інше) від дисперсних частинок на виході з апарату в атмосферу не більше 20 мг/м<sup>3</sup>;
- повністю зібрати «MV-2» на заводі-виробнику, що забезпечує високу якість збирання внутрішнього обладнання, дозволяє виконати попередню наладку (70 % від налагоджувальних робіт) внутрішнього обладнання в лабораторних умовах та поставляти апарат споживачу монтажними модулями;
- на місці монтажу виконувати тільки крупновузлове модульне збирання апарату, що значно економить кошти замовника на монтажних та шеф-монтажних роботах.

Розроблена конструкція установки «MV-2» призначена для очищення агломераційних газів з ефективністю 95—99 %. Може бути використано для очищення також в інших галузях. Причому об'єм газів що очищаються може досягати від 10 тис. м<sup>3</sup>/год. до 1млн. м<sup>3</sup>/год. Модулі можуть бути використані як основні ступені очищення, так і попередні. Наприклад для зниження навантаження на рукавну систему очищення.

Установка «MV-2» дозволяє знешкоджувати CO, SO<sub>2</sub>, виконувати функцію іскрогасіння за рахунок лабіринтів осаджувальних систем, що збільшує термін експлуатації фільтрувальних матеріалів.

Розроблені наступні блоки:

№ 1. Блок комбінованої електронно-іонної технології очищення газів (рис. 3, б) (щільність розряду, що коронує, збільшено у 10 разів порівняно з існуючими конструкціями електрофільтрів, без збільшення витрати електроенергії.

№ 2. Блок перетворювання та управління каскадною енергією аеродинаміки турбулентного і ламінарного потоків інерційного осадження дисперсійної зависі (рис. 3, в);

Розроблено осаджувальні елементи, а також схема їх розташування для кожного окремого випадку дозволяє отримувати найбільший ефект виділення заряджених частинок

У невеличких внутрішніх габаритах корпусу блоку (довжина 2,6 м, ширина 1,78 м, висота 2,2 м) загальна площа осадження дисперсної зависі становить 336 м<sup>2</sup>.

#### **Техніко-експлуатаційні характеристики «MV-2».**

Загальна вага та габарити відокремлених модульних блоків апарата з бункером збирання пилу не більше: блок № 1: — довжина 0,75 м, висота 3,7 м, ширина 2,0 м, Вага до 1,5 т; блок № 2: — довжина 3,0 м, висота 3,7 м, ширина, 2,0 м. Вага до 5 т.

Кожен блок розраховано на продуктивність 30000 м<sup>3</sup>/год. за об'ємом газів при температурі не більше 300 °С. (Можлива конструкція апарата високотемпературного виконання до 600 °С. Залежно від об'єму газового потоку та потрібного ступеня очищення, «MV-2» комплектується необхідною кількістю модульних блоків відповідною технологією очищення (рис. 3, з).

*Опір:* не більше 400 Па, не у залежності від кількості модульних блоків у загальній компоновці.

*Енергоспоживання:* до 0,3 кВт/год. на 1000 м<sup>3</sup>. Система регенерації вібраційна: механізми регенерації (вібратори) розташовані поза активної зони апарату.

*Високовольтне обладнання:* До комплектації апаратів входить агрегат живлення електродів, шафа управління агрегатом живлення і механізмом струшування електродів. Залежно від об'єму газового потоку та потрібного ступеня очищення, «MV-2» комплектується необхідною кількістю агрегатів живлення, механізмами регенерації, шафами управління та іншим високовольтним обладнанням.

Пристрої вивантажування пилу до комплекту включаються тільки на вимогу замовника.

Конфузор, дифузор та додаткове обладнання — відповідно до проекту прив'язки.

Зліва направо: Блок № 1 комбінованої електронно-іонної технології очищення газів. Блок № 2 перетворення та управління каскадною енергією аеродинаміки турбулентного і ламінарного потоків інерційного осадження дисперсійної пилової складової.

Для умов роботи агломераційної машини типу АКМ-75 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» було розроблено апарат «MV-4/6-400» (рис. 4).

#### **Техніко-економічні характеристики «MV-4/6-400»**

*Продуктивність,* нм<sup>3</sup>/год. — 400000.

*Загальна вага з бункером пилу,* кг — до 85000.

*Габарити,* мм: довжина — 11350; ширина — 8000; висота — 6500.

*Електроживлення,* кВт/год. — не більше 38.

*Опір,* Па — не більше 300.

*Робоча температура,* °С — до 280.

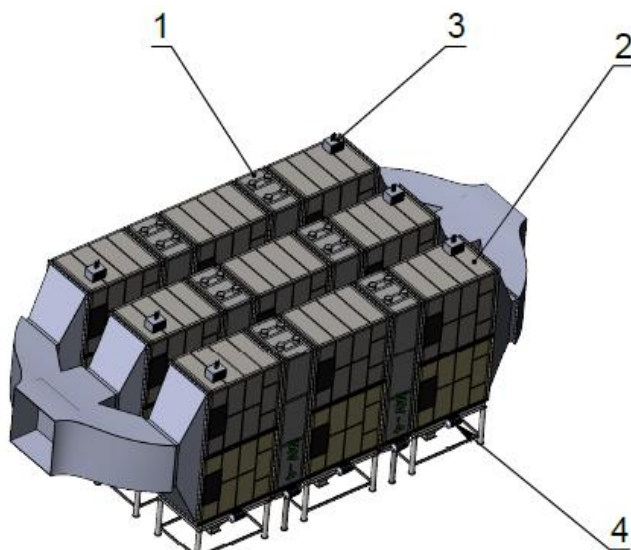
*Система регенерації* — вібраційна, вібратори — 127, шт. — 6.

До комплектації апарату входить 6 агрегатів живлення електродів та 6 шаф управління агрегатами живлення і механізмами струшування електродів.

*ККД,* % — 99.

Це обладнання можна встановити замість батарейних циклонів.





*Рис. 4.* Газоочисний електроапарат модульного типу «MV-4/6-400»: 1 — блок комбінованої електронно-іонної технології очищення газів (6 шт.); 2 — блок перетворювання та управління каскадною енергією аеродинаміки турбулентного і ламінарного потоків інерційного осадження дисперсної зависі (6 шт.); 3 — агрегат живлення електродів (6 шт.); 4 — вібратор (6 шт.)

Питомий вихід газів від агломераційних машин визначається газопроникністю шихти, вмістом у ній палива, величиною підсмоктування повітря і може становити 2500—4800 м<sup>3</sup>/т агломерату. Склад газів, що відходять, залежить від режиму спікання складу руди і коксика і може коливатися в широких межах: 16—25 % CO<sub>2</sub>; 2,5—5 % CO; 0,5—1,8 % SO<sub>2</sub>; 0,1—0,2 % NO<sub>x</sub>; інше — N<sub>2</sub> та інертні гази [9, 16—18].

Десульфурація (сіркоочищення) відпрацьованих газів займає ключове місце в галузі охорони навколишнього середовища. Оксиди сірки, а також кислоти (H<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> і H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) погіршують екологічний стан регіону і значно пришвидшують є корозію машин, механізмів та споруд.

Викиди сірчистого ангідриду в поступово перетворюються на сірчану кислоту. З метою скорочення величезних економічних збитків, завданих викидами оксидів сірки, було підписано Конвенцію ЄЕК ООН щодо скорочення транскордонного перенесення оксидів сірки на території Європи. Відповідно до цієї Конвенції країни учасниці зобов'язалися скоротити викиди сірчистих сполук в атмосферу на 30 % [2—4].

Сьогодні існує два основних напрямки зниження викидів оксидів сірки у газах, що відходять:

- попереднє (перед спалюванням) зниження сірки у вихідному паливі (десульфурації палива);
- очищення димових газів, що викидаються в атмосферу, від оксидів сірки за допомогою спеціальних установок.

Відомо більше 80 способів зниження вмісту SO<sub>2</sub> у газах, що відходять. В основному це установки які використовують гідрат оксиду кальцію або вапняку. Готовий продукт — гіпс, або сульфатно-сульфітної суміші.

Основним завданням системи десульфурації є:

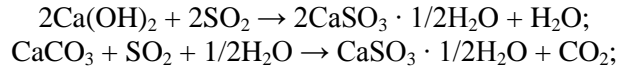
- мінімізації поточних енерговитрат при експлуатації системи сіркоочищення;
- отримання якісного корисного продукту (гіпс, сірка, сірчана кислота, добрива тощо) з димових газів, що відходять, з можливістю подальшого використання в господарстві, тим самим підвищуючи екологічне обґрунтування та економічну доцільність застосування методів десульфурації. Серед традиційних методів десульфурації промислових газів, що відходять, безперечними лідерами за кількістю побудованих установок є тех-

нології з використанням вапняку або вапна. Ці методи застосовуються більш ніж на 80 % установок десульфурації, що діють у світі.

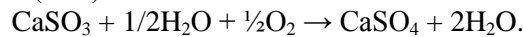
Більшість цих установок заснована на використанні окремих вузлів:

1-а стадія — передочищення, де димові гази спочатку очищаються від пилу (золи) до нормованих значень (20—50 мг/м<sup>3</sup>);

2-а стадія — очищення від діоксиду сірки (абсорбера), де відбувається абсорбція SO<sub>2</sub> водним розчином вапна або вапняку, що призводить до утворення одних і тих же продуктів, наприклад:



3-я стадія — окислення сульфїту кальцію, де після стадії абсорбції суспензію обробляють повітрям у спеціальних ємностях. Кисень повітря доокислює сульфїт кальцію в нейтральний сульфат (гіпс).



На сьогоднішній день в Україні розроблено нову технологію, що дозволяє значно оптимізувати процес десульфурації, підвищуючи економічну та екологічну складові цього процесу.

Плазмово-каталітичний реактор (ПКР) «MV-2JS», виробництва ТОВ «Придніпровський механічний завод», м. Кам'янське, Україна, призначений для очищення газоподібних складових (SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>) димових газів, які попередньо очищені від пилу на рівні 20—50 мг/м<sup>3</sup>.

Принцип роботи апарату полягає у виробництві озону, який утворюється в коронному розряді, за допомогою якого відбувається повне доокислення діоксиду сірки SO<sub>2</sub> у триоксид сірки SO<sub>3</sub>. Апарат складається з блоку ПКР, який дозволяє виробляти необхідну кількість озону при пропусканні через нього повітря та блоку живлення (трансформатора). Кількість виробляемого озону залежить від кількості електродів у плазмово-каталітичному реакторі MV-2JS (рис. 5).

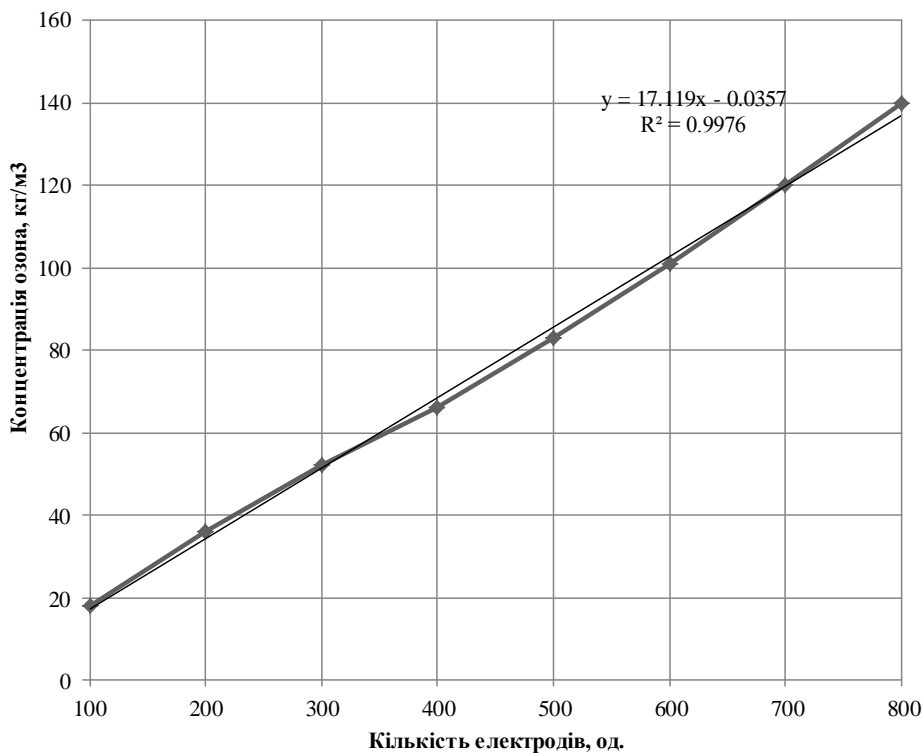
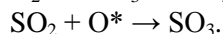
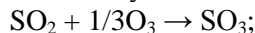


Рис. 5. Залежність кількості озону, що виробляється від кількості електродів у плазмово-каталітичному реакторі

При обробці сірковмісного газу озоном відбуваються такі основні хімічні реакції:



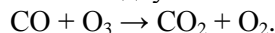
Застосування ПКР MV-2JS в існуючій традиційній технології десульфурації дозволяє повністю відмовитися від третьої стадії процесу — окислення сульфїту кальцію в спеціальних ємностях. Встановивши ПКР «MV-2JS» безпосередньо перед реактором-адсорбером по ходу димових газів, на вході в реактор-адсорбер, на відміну від існуючої традиційної технології сіркоочищення, отримуємо замість сірчистого ангїдриду  $\text{SO}_2$  — сірчаний ангїдрид  $\text{SO}_3$ , що у свою чергу дозволить отримати на виході товарний високоякісний гіпс, що не містить у собі шкідливих токсичних домішок та не потребує процесу доокислення.

Отримуваний гіпс може бути двоводним  $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$  або безводним  $\text{CaSO}_4$  (ангїдрид, який найбільш цінний при виробництві будівельних матеріалів). Цей гіпс має вищі споживчі властивості при виробництві будівельних сумішей (практична відсутність сторонніх речовин, висока білизна, гарний гранулометричний склад), ніж природний матеріал.

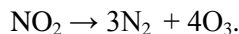
При зрошенні сірковмісних димових газів водою, обробленою озоном, нижчі оксиди азоту  $\text{NO}$  і  $\text{NO}_2$  та сірки  $\text{SO}_2$  переходять у вищі  $\text{N}_2\text{O}_5$  та  $\text{SO}_3$ . При цьому утворюється суміш азотної та сірчаної кислоти. Цю суміш нейтралізують введенням амїачної води, що призводить до отримання амїачної селїтри  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  та сульфату амонїю  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . Ці речовини виводять із циклу і використовують як добрива. Крім того, якщо в сірковмісних газах низький вміст оксидів азоту, то можливе одержання товарної сірчаної кислоти ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ).

ПКР «MV-2JS» є електроапарат мало витратний в експлуатації. За рахунок особливостей конструкції може виробляти необхідну кількість озону, необхідного для обробки димових газів з метою доокислення шкідливих складових ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}$ ), що дозволяє одержувати на виході товарну продукцію (добрива, гіпс, сірчану кислоту тощо). Витрата електроенергії становить від 5—15 кВт/год. залежно від обсягу виробленого озону.

Крім цього при обробці газів озоном відбувається повне доокислення  $\text{CO}$  по реакції



Для видалення оксидів азоту треба пропустити димовий газ, очищений від сірки та оксиду вуглецю через плазмово-каталітичний реактор. При цьому відбувається розкладання оксидів азоту за реакцією



Також ці апарати можуть бути використані для очищення питної води, дезінфекції приміщень тощо.

### Висновки

1. Запропоновано застосування у нових електрофільтрах інтенсивної електронно-їонної технології.
2. Встановлено, що комбінований рух газів забезпечує зарядження всієї сукупності частинок пилу до граничних величин шляхом організації високотурбулізованого потоку та перебування частинок пилу у зонах з найбільшою напруженістю у чохлах коронного заряду, а також ефективного вловлювання заряджених частинок пилу у ламінарних шарах поблизу осаджувальних елементів.
3. Проведено математичне моделювання блоку осадження з метою оптимізації конфігурації. Встановлено основні залежності кількості та взаємного розташування осаджуючих елементів для забезпечення максимального осадження пилу.
4. Проведені дослідження спектрів швидкостей газового середовища у моделях нових електрофільтрів. Визначені оптимальні живі перетини аеродинамічних перегородок для забезпечення сприятливих умов зарядження завислих частинок та рівномірної роздачі потоку, що очищається, по вічкам що вловлюють.
5. Розроблено модульну систему «MV-2» продуктивністю 30 тис  $\text{nm}^3/\text{год.}$ , на основі використання комбінованої електро-їонної технології очистки та зміни потоків газу, інерційного осадження пилу, з раціональним використанням каскадної енергії
6. Для агломашин ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» м. Кам'янське, Україна розроблено установку продуктивністю до 9 тис.  $\text{nm}^3/\text{хв.}$

7. Запропоновано плазмово-каталітичний реактор «MV-2JS», який дозволяє у мало витратний спосіб виробляти необхідну кількість озону для доокислення шкідливих складових ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) газів, що відходять.
8. Застосування даного апарату дозволяє крім очищення димових газів від шкідливих газових домішок отримувати на виході товарну продукцію (добрива, гіпс, сірчану кислоту тощо) та повністю позбутися твердих та рідких відходів при десульфурації газів.

### Список використаної літератури

1. Величко А.Г., Бобылев В.П., Турищев В.В. Эколого-технологические аспекты расширения ресурсосберегающих функций агломерационного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2012. № 2. С.107—109.
2. Агломерационные установки большой мощности по переработке железных руд. Материалы симпозиума с участием фирмы «Лурги», ФРГ. Кривой Рог. 1974.
3. Пицък Ю.В., Шишацкий А.Г., Агапова В.Г. Пути повышения экологической безопасности в зоне влияния агломерационного производства. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2010. № 5. С.97—99.
4. Мищенко И.М., Егоров Н.Г. Возможности кардинального сокращения пылевых и газовых выбросов в агломерационном производстве. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2005. № 4.
5. Кричевский А.З. Совершенствование технологии агломерационного производства. Киев: Техника, 1989. 77 с.
6. Совершенствование агломерационного процесса / Ф.Ф.Колесанов [и др.]. К.: Техника, 1983. 110 с.
7. Совершенствование технологии спекания агломерата / Р.С.Берштейн [и др.]. Днепропетровск: Промінь, 1975. 11 с.
8. Рихтер Л.А. Пути повышения эффективности работы электрофильтров. *Теплоэнергетика*, 1991, № 5. С. 5—9.
9. Баранов Л.П., Верещагин И.П., Белоусов В.В. Процесс улавливания в электрофильтре высокоомной пыли ферросплавного производства с ограничением обратной короны. *Известия ВУЗ Черная металлургия*, 1991, № 3. С. 31—38.
10. Баранов Л.П., Голоднова Т.С., Голоднов Н.Н. Экспериментальное определение физической скорости дрейфа частиц в модели электрофильтра. *Экологические проблемы приднепровско-донецкого региона: тез. конференции* Запорожье, 1995. С. 9—10.
11. Баранов Л.П., Голоднова Т.С., Коновалов Н.А., Лахно Н.И., Голоднов Н.Н. Кинофоторегистрация движения высокодисперсных частиц в двухфазных потоках. *Экологические проблемы приднепровско-донецкого региона: тез. конференции*, Запорожье, 1995. С. 7—8.
12. Патент (СССР) 1820877 АЗ В03С 3/45 Осадительный электрод электрофильтра / Л.П. Баранов, Н.Н. Голоднов, Т.С. Голоднова и др. Заявка № 4928174/26, заявлено 16.04.91г. Опубл. 07.06.93 г. Бюл. № 21.
13. А.с. 1791998 (СССР) В03С 3/08 Электрофильтр /Л.П. Баранов, Т.С. Голоднова, Н.Н. Голоднов, С.Н. Храпков, А.К. Гришечкин. Заявка № 4902443/26, заявлено 14.01.91г.
14. Электрофільтр: пат. 150801 Україна: МПК В03С 3/08, заявл. 23.11.2021, опубл. 20.04.2022. Бюл. № 16.
15. Руденко М.Р., Кашеев М.А., Нагорный Э.М., Руденко Р.М., Сорока О.В. Дослідження ефективності зниження викидів від зон спікання агломашин. *Метал та литво України.*, 2021. №3 (326). С. 64—68.
16. Saleem A., Janssen R.E., Ireland P.A.  $\text{SO}_2$ , N, P, K.
17. Gall R.L., Piasecki E.J. The Double Alkali Wet Scrubbing System. *Chem. Engin. Progress*. 1975. Vol. 71, №5. P. 72.
18. Schug E. Sulphur nutritional status of European crops and consequences for agriculture. Sulphur Institute. Washington, D.C., 1991.

## COMPLEX TECHNOLOGY OF THE CLEANING OF AGGLOMERATION GASES FROM DUST AND HARMFUL GASES WITH OBTAINING A GOOD PRODUCT

### Abstract

The purpose of the work is to improve the design of the dust-catching device of the sintering machine, to increase the efficiency of catching charged dust particles in laminar layers near the precipitating elements, the configuration and location of the elements of the precipitating elements, to establish the dependence of the effective (calculated) drift speed of charged dispersed particles on the speed of the medium being cleaned, with classical the process of electrogas purification and the combined flow of gases in electrofilters.

It was established that the combined movement of gases in a modular unit ensures the charging of the entire population of dust particles to the limit values by organizing a highly turbulent flow and keeping dust particles in the zones with the greatest tension in the corona charge covers, as well as effective trapping of charged dust particles in laminar layers near the precipitating elements.

Mathematical modeling of the deposition block was carried out in order to optimize the configuration. The main dependences of the number and mutual location of precipitating elements to ensure maximum dust deposition were established. Studies of gas medium velocity spectra in models of new electrostatic precipitators have been carried out. The optimal live cross-sections of the aerodynamic partitions are determined to ensure favorable conditions for charging suspended particles and uniform distribution of the cleaned flow through the catching holes.

The MV-2 modular type electric gas purification device with a capacity of 30 thousand  $\text{nm}^3/\text{h}$  has been developed, based on innovative developments in the field of KEIT (combined electro-ion gas purification technology) in the field of conversion and control of cascade energy and aerodynamics of turbulent and laminar flows during inertial deposition dispersed suspension of flue gases.

An apparatus for cleaning gases from a sinter machine with a capacity of up to 400,000  $\text{nm}^3/\text{h}$  is proposed. with an efficiency of 99 %, for replacing existing equipment (multicyclones). "MV-2JS" electric device was developed. This is a plasma-catalytic reactor, which allows you to produce the necessary amount of ozone in a low-cost way to oxidize the harmful components ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}$ ) of the outgoing gases. The use of this device allows, in addition to the cleaning of flue gases from harmful gas impurities, to obtain commercial products (fertilizers, gypsum, sulfuric acid, etc.) at the output and to completely get rid of solid and liquid waste during gas desulfurization.

### References

- [1] Velichko A.G., Bobilev V.P., & Turishchev V.V. (2012) Ekologo-tehnologichni aspekty rozshyrennya resursozberihayuchykh funktsiy ahlomeratsiynoho vyrobnytstva [Ecological and technological aspects of expanding the resource-saving functions of sinter production]. *Metallurgical and mining industry*. No. 2. P. 107—109 [in Russian].
- [2] Aglomeratsionnyye ustanovki bol'shoy moshchnosti po pererabotke zheleznykh rud [High-capacity sintering plants for processing iron ore // Materials of a symposium with the participation of the Lurgi company], (1974), Germany, Krivoy Rog, [in Russian].
- [3] Pitsyk Yu.V., Shishatsky A.G., & Agapova V.G (2010) Puti povysheniya ekologicheskoy bezopasnosti v zone vliyaniya aglomeratsionnogo proizvodstva. [Ways to improve environmental safety in the zone of influence of sinter production]. *Metallurgical and mining industry*. No. 5. P. 97—99 [in Russian].
- [4] Mishchenko I.M. & Egorov N.G. (2005) Mozhlyvosti kardynal'noho skorochennya pylovykh ta hazovykh vykydiv v ahlomeratsiynomu vyrobnytstvi. [Possibilities of radical reduction of dust and gas emissions in sinter production] *Metallurgical and mining industry*. No. 4 [in Russian].
- [5] Krichevsky A.Z. (1989). *Udoskonalennya tekhnolohiyi ahlomeratsiynoho vyrobnytstva. [Improving the technology of sinter production]* Kyiv: Technology, 77 p. [in Russian].
- [6] Kolesanov F.F [etc.]. (1983) *Udoskonalennya ahlomeratsiynoho protsesu [Improvement of the sintering process.]*. Kyiv: Technology, 110 p. [in Russian].

- [7] Bershtein R.S [et al.]. (1975). *Udoskonalennya tekhnolohiyi spikannya ahlomeratu Improving the technology of agglomerate sintering*. Dnepropetrovsk: Promin,.11 p. [in Russian].
- [8] Richter L.A. (1991) Shlyakhy pidvyshchennya efektyvnosti roboty elektrofil'triv [Ways to increase the efficiency of electric precipitators]. *Teploenerhetyka – Thermal power engineering*, No. 5. P.5—9. [in Russian].
- [9] Baranov L.P., Vereshchagin I.P., Belousov V.V. (1991) Protsey ulovlyuvannya v elektrofil'tri vysokoomnoho pyly ferosplavnoho vyrobnytstva z obmezhenyamy zvorotnoyi korony. [The process of collecting high-resistivity dust from ferroalloy production in an electric precipitator with limited reverse corona]. *Izvestiya VNZ Chorna metalurhiya, – Izvestia University of Ferrous Metallurgy*, No. 3. P. 31—38. [in Russian].
- [10] Baranov L.P., Golodnova T.S., & Golodnov N.N. (1995). Eksperymental'ne vyznachennya fizychnoyi shvydkosti dreyfu chastynok u modeli elektrofil'tra [Experimental determination of the physical speed of particle drift in a model of an electric precipitator ]. *Ekolohichni problemy prydniprovsk'ko-donets'koho rehionu – Ecological problems of the Dnieper-Donetsk region: abstract. Conferences. Zaporozhye*, P.9—10. [in Russian].
- [11] Baranov L.P., Golodnova T.S., Konovalov N.A., Lakhno N.I., Golodnov N.N. Film and photo recording of the movement of highly dispersed particles in two-phase flows // Ecological problems of the Dnieper-Donetsk region: abstract. Conferences – Zaporozhye, 1995. P.7—8 [in Russian].
- [12] Patent 1820877 (USSR) B03C 3/45 Precipitating electrode of an electric precipitator / L.P. Baranov, N.N. Golodnov, T.S. Golodnova and others - application No. 4928174/26, declared 04.16.91. Publ. 06.07.93 Bull. No. 21 [in Russian].
- [13] A.s. 1791998 (USSR) B03S 3/08 Electric precipitator / L.P. Baranov, T.S. Golodnova, N.N. Golodnov, S.N. Khrapkov, A.K. Grishechkin - application No. 4902443/26, declared 14.01.91 [in Russian].
- [14] Patent of Ukraine No 150801 "Electrofilter". Kashcheev M.A., Vladi V.A., Manzenko S.V., Kkashcheev E.M., Rudenko N.R., published on 20.04.2022. Bull. No. 16 [in Ukrainian].
- [15] Rudenko M.R., Kashcheev M.A., Nagorny E.M., Rudenko R.M., & Soroka O.V. (2021). Doslidzhennya efektyvnosti znyzhennya vykydiv vid zon spikannya ahlomashyn. [Research on the effectiveness of reducing emissions from sintering zones of sinter machines.] *Metal ta lytvo Ukrayiny.– Metal and casting of Ukraine*, vol 29. No. 3 (326). P.64-68 [in Ukrainian].
- [16] Saleem A., Janssen R.E., Ireland P.A. SO<sub>2</sub>, N, P, K.
- [17] Gall R.L., Piasecki E.J. (1975) The Double Alkali Wet Serubbing System // Chem. Engin. Progress.Vol. 71, N 5. P.72.
- [18] Schug E. (1991) Sulphur nutritional status of European crops and consequences for agriculture / Sulphur Institute. Washington, D.C.

Надійшла до редколегії 14.10.2024