

УДК 504.3.054+504.064.4+66-935.4
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).22](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).22)

IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM OF ASPIRATION IN THE PROCESSES OF TRANSPORTING BULK MATERIALS ON THE EXAMPLE OF A COKE SORTING SECTION

ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СИСТЕМИ АСПІРАЦІЇ В ПРОЦЕСАХ ТРАНСПОРТУВАННЯ СИПКИХ МАТЕРІАЛІВ НА ПРИКЛАДІ ДІЛЬНИЦІ КОКСОСОРТУВАННЯ

Volodymyr A. Halay
vladimir1976galay@gmail.com
ORCID: 0009-0007-4404-0353
Nataliia M. Maksimova
natalya.maksimova@mipolytech.
education
ORCID: 0000-0003-1684-7479

В. А. Галай,
магістр
Н. М. Максимова,
канд. техн. наук, доцент

LTD “Metinvest polytechnic technical university”, Zaporizhzhia
ТОВ «Технічний університет «Метінвест політехніка», м. Запоріжжя

Abstract. The aim of the research is to find the optimal option for improving the aspiration system of the existing coke sorting plant to ensure air quality in the working areas of maintenance personnel, reduce the environmental impact on the environment, comply with the standards established by law and optimise production operating costs. *Methods.* In order to study the improvement of ways to remove contaminated air from the working areas of personnel at the coke sorting section of the coke shop, instrumental measurements of coke dust content in the air of the working areas of the coke sorter premises were carried out during the operation of the plant and repeated measurements at the same points without the use of a gas cleaning unit. The main parameters of the bag filter were determined by calculation. *Results.* The quality of air in the working areas and the discharged air is satisfactory as it meets the established regulatory values, but in the context of current trends aimed at increasing air quality requirements and indicators of resource and energy efficiency of production, further research into improving the aspiration systems and gas cleaning plant at the coke sorting areas of the coke shop becomes relevant. In order to clean the air from dust coming from the screens and roll sieves overflow areas, it is advisable to either reconstruct or replace the aspiration and gas cleaning unit due to a number of operational shortcomings: complicated adjustment of gas flow distribution; susceptibility of gas ducts to abrasive wear; hydraulic resistance of the branched gas duct system; inability to adjust the system to the actual needs of the production process. It is advisable to reduce the performance of the aspiration device to the minimum possible, taking into account the cessation of dust exit from the shelter, by installing local dust extraction devices. *Scientific novelty.* Ways to improve the aspiration system and gas cleaning unit at the coke sorting section of the coke shop through the use of local aspiration devices of optimal performance have been identified and substantiated. *Practical significance.* The use of local dust protection devices has been substantiated, which simplifies the return of captured dust to the technological process and significantly reduces energy consumption for coke production.

Key words: aspiration and gas cleaning systems; gas cleaning units; dust; coke sorting section of the coke shop; bag filter.

Анотація. Мета. Метою досліджень є пошук оптимального варіанту вдосконалення системи аспірації існуючої установки сортування коксу для забезпечення якості повітря в робочих зонах обслуговуючого персоналу, зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище, виконання норм встановлених законодавством та оптимізацію операційних витрат виробництва. *Методика.* Задля дослідження удосконалення шляхів видалення забрудненого повітря із робочих зон персоналу на дільниці коксортування коксового цеху було проведено інструментальне вимірювання вмісту коксового пилу в повітрі робочих зон приміщень коксортувальки під час роботи установки та повторне вимірювання в тих самих точках без використання газоочисної установки. Основні параметри рукавного фільтру визначено розрахунково. *Результати.* Якість повітря в робочих зонах і повітря, яке скидається, є задовільною, оскільки відповідає встановленим нормативним значенням,

але в контексті сучасних тенденцій спрямованих на підвищення вимог щодо якості повітря та показників ресурсо- та енергоефективності виробництва набуває актуальності подальше дослідження вдосконалення системи аспірації та газоочисної установки на дільницях коксортування коксового цеху. Для очищення повітря від пилу, що надходить від місць пересипів грохотів та валкових сит, установку аспірації та очищення газів доцільно або реконструювати, або замінити з причин виявлення ряду експлуатаційних недоліків: ускладнена наладка розподілу газового потоку; схильність газоходів до абразивного зношення; гідравлічний опір розгалуженої системи газоходів; неможливість підлаштовувати систему під фактичні потреби виробничого процесу. Доцільно зменшити продуктивність аспіраційного пристрою до мінімально можливої з урахуванням забезпечення припинення виходу пилу з укриття, шляхом встановлення місцевих пиловсмоктуючих пристроїв. *Наукова новизна.* Виявлені та обґрунтовані шляхи вдосконалення системи аспірації та газоочисної установки на дільниці коксортування коксового цеху за рахунок застосування аспіраційних пристроїв місцевої дії оптимальної продуктивності. *Практична значимість.* Обґрунтовано використання місцевих пилозахисних пристроїв, що спрощує повернення уловленого пилу в технологічний процес та значно зменшує витрати енергії на виробництво коксу.

Ключові слова: системи аспірації та газоочисної установки; установки очистки газу; пил; дільниця коксортування коксового цеху; рукавний фільтр.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

В залежності від рівня модернізації технологічного устаткування коксохімічне виробництво може суттєво впливати на здоров'я персоналу та на компоненти довкілля. В основних технологічних процесах на коксохімічних заводах утворюються газоподібні, рідкі та тверді відходи. Хімічний і речовинний склад відходів вирізняються великим розмаїттям, що вимагає застосування складного технологічного устаткування для їхнього знешкодження та утилізації. Основне джерело викидів в повітря – це гази від процесу коксування. Крім того, наявно багато розсіяних викидів від різних джерел, таких як розвантаження, зберігання, транспортування, дроблення і змішування (підготовлення) вугілля, витік із кришок і розрівнювачів, дверей коксових печей, підйомних труб і завантажувальних вікон для вугілля та видачі коксу з камер, гасіння коксу та сортування (дроблення і грохочення), транспортування, обіг і зберігання [1-3]. Загалом кількісна оцінка викидів твердих частинок під час транспортування корисних копалин є складною задачею при аналізі неорганізованих викидів на промислових майданчиках, оскільки процес навантаження сипких матеріалів супроводжується викидами твердих частинок речовин, особливо в умовах слабого вітру [4]. Отже, однією з основних проблем коксохімічного виробництва є наявність великої кількості імовірних джерел неорганізованих викидів.

В технологічних газах, аспірованому та навколишньому повітрі коксохімічних виробництв, окрім типових для виробництва чавуну і сталі викидів пилу, оксидів вуглецю, сірки й азоту, додатково вбачають як характерні забруднювачі речовини атмосферного повітря – аміак, фенол та інші, концентрації яких наведені в табл. 1 [2, 5].

Аналіз даних [5], представлених в табл. 1, показує, що концентрації таких шкідливих речовин, як бензол, нафталін, бензапирен, у продуктах горіння

і неорганізованих викидах перевищують гранично допустимі концентрації (ГДК) у повітрі.

Розсіяні/неконтрольовані викиди летючих органічних сполук (ЛОС) в повітря можуть відбуватися з коксових батарей, а розсіяні (неконтрольовані/неорганізовані) викиди аміаку і високотоксичних хімікатів (ВТХ) (бензолу, толуолу, ксилолу) – від установок для переробки побічних продуктів [7-8], які мають потенціал утворення неприємних запахів. Викиди пилу і діоксиду сірки (SO_2) – з коксових заводів та інших установок, в яких коксовий газ використовується як паливо [9-10]. Наприклад, десульфуризація коксового газу є пріоритетним засобом мінімізації цих викидів [1-2]. Оптимізоване управління коксовим газом та його використання в інших процесах металургійних заводів із повним циклом допомагає економити енергію та мінімізувати викиди у повітря [2, 11].

Після очищення гази підлягають розсіюванню в атмосферному повітрі, їх викид здійснюється через високі димові труби [2, 5, 9, 12].

Під час сортування валового коксу на товарні класи за крупністю основною забруднюючою речовиною повітря є пил. Затверджені наказом Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309 норматив граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел у вигляді суспендованих твердих частинок від коксових печей, недиференційованих за складом, становить 50 мг/м^3 [13]. Однак рівні встановлені дозволами на такі викиди в повітря стаціонарними джерелами для підприємств зазвичай є меншими.

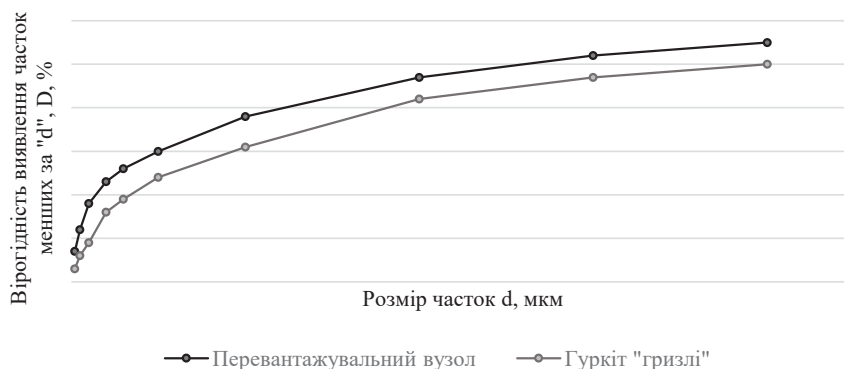
Дисперсний склад коксового пилу на коксортувальці можна відобразити у вигляді долі маси часток різних фракцій, графік розподілу яких представлено на рис. 1. За даними [14] коксовий пил характеризується крупністю 80 – 340 мкм.

Коксовий пил майже не злежується [3, 15]. Коксовий пил належить до групи гідрофобних часток,

Таблиця 1. Питомі викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря коксохімічного виробництва [2, 5]

Найменування інгредієнтів	Викиди, г/т кокса (мг/м ³ у відходящих та аспіраційних газах)	Гранично допустима концентрація (ГДК) в повітрі, мг/м ³ [6]	
		максимально разова ГДК р.з.	середньодобова ГДК с.д
1. Аміак, NH ₃	177-490 (220)	0,2	0,004
2. Сірководень, H ₂ S	15-20 (10)	0,008	0,008
3. Монооксид вуглецю, CO	1050-1380 (706)	20	3
4. Ціанистий водень, HCN	7-10 (5)	0,3	0,01
5. Фенол, C ₆ H ₅ OH	80-90 (60)	0,3	0,003
6. Бензол, C ₆ H ₆	60-70 (46)	5	0,1
7. Нафталін, C ₁₀ H ₈	30-50 (24)	20	0,003
8. Бензапирен, C ₂₀ H ₁₂	1-3 (1,2)	0,00015	10 ⁻⁶
9. Діоксид сірки, SO ₂	500-1650 (630)	10	0,5
10. Оксиди азоту, NO _x	150-170 (94)	5	0,085
11. Пил	1750-2590 (1276)	4-6	0,5
12. Сажа, графіт	Н.д.	0,15	0,005

Примітка: «Н.д.» – немає даних.


Рис. 1. Дисперсний склад коксового пилу [14]

що є протипоказником для уловлювання в мокрих апаратах.

Пожежо- та вибухонебезпечні властивості – визначають пріоритети під час вибору між мокрим та сухим способами пиловловлювання та спонукають до розробки особливих технологічних та конструктивних заходів для попередження аварійних ситуацій. Коксовий пил вибухових властивостей не має, температура займання – 470-670°C [16].

При транспортуванні, перевантаженні, грохоченні коксу відбувається інтенсивне пиловиділення [3, 17], що обумовлює необхідність передбачення аспіраційної системи для видалення шкідливих речовин з повітря виробничих приміщень.

Удосконалення технічних і організаційних заходів спрямованих на покращення умов праці та мінімізації навантаження на повітря є запорукою сталого розвитку виробництва. Аспірація є необхідною складовою процесів, що супроводжуються виділенням пилу і газів, тому пошук шляхів вдосконалення систем аспірації та газоочисних установок, зокрема на дільниці коксортування коксового цеху, є актуальним науково-практичним завданням.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Система збору та відведення пилових викидів від джерел пилоутворення значною мірою залежить від характеру виробничого процесу [18]. Найчастіше ця система включає в себе пиловловлюючий пристрій та систему повітропроводів для переміщення забрудненого повітря. Під час вибору конструкції та розробки проєкту місцевої аспірації важливо враховувати наступні аспекти [14, 19]:

- повітрозаборні куполи (зонти) і повітропроводи повинні інтегруватися в єдину конструкцію з технологічним обладнанням і не перешкоджати виконанню технологічного процесу [23];

- зріз зонти має бути максимально наближеним до джерела пилоутворення;

- розміри зрізу зонти повинні бути або рівними, або трошки більшими за джерело пилоутворення;

- зменшення розмірів кожуха призводить до збільшення потрібного об'єму повітря;

- орієнтація зонти повинна враховувати можливі відхилення потоку виділень шкідливих речовин від природного напрямку руху;

– потрібно уникати проходження потоку виділень шкідливих речовин через зону, де працюють робітники, які можуть вдихати це повітря;

– гострі кромки забірної кожуха слід округлювати для уникнення перешкод на шляху руху повітря;

– поле швидкостей в приймальному отворі кожуха рекомендується регулювати відповідно до швидкості в потоці виділень шкідливих речовин, використовуючи вставки, розсіювачі та випрямляючі решітки.

До складу аспіраційних систем включають сухі і мокрі пиловловлювачі, зазвичай застосовують двоступінчасту схему очищення [20]. В якості першого ступеня використовують одиночні та групові циклони, що мають досить високу ефективність пиловловлювання (87-97%) для крупнодисперсного пилу [17]. На другому ступені – мокрі пиловловлювачі, зокрема скрубери (до 99%). Ефективність роботи останніх обумовлена переважно витратою зрошувальної рідини і якістю її розпилення. Найбільш прогресивним і дієвим способом боротьби з пилом в промисловому виробництві, який дозволяє досягнути ступеню очищення повітря вище ніж 99,95%, є використання рукавних фільтрів [21].

Наразі відмічається світова тенденція щодо підвищення вимог до якості атмосферного повітря [22]. Зокрема гігієнічні регламенти Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ) щодо якості повітря (AQG) у 2021 році було переглянуто та підвищено вимоги щодо запиленості повітря [23]. Хоча вони носять рекомендаційний характер для урядів різних країн, але відображають глобальну ціль спрямовану на покращення здоров'я населення шляхом зменшення забруднення повітря [24].

ВИДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Мінімізація впливу на довкілля коксохімічного виробництва можлива шляхом глибокої модернізації основних технологічних процесів і обладнання, включно з газоочисними апаратами та установками [2, 21-22].

Розглянемо можливості вдосконалення системи аспірації коксового пилу з робочих зон персоналу дільниці коксортувалки з подальшим очищенням повітря що скидається від пилу.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою досліджень є пошук оптимального варіанту вдосконалення системи аспірації існуючої установки сортування коксу для забезпечення якості повітря в робочих зонах обслуговуючого персоналу, зменшення екологічного навантаження на повітря та оптимізацію операційних витрат виробництва.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Об'єктом дослідження є видалення забрудненого повітря із робочих зон персоналу та його рециркуляція після очищення.

Предмет дослідження – система аспірації коксортувалки коксового цеху.

Задля дослідження удосконалення шляхів видалення забрудненого повітря із робочих зон персоналу на дільниці коксортування коксового цеху та рециркуляції повітряного потоку після очищення було використано методи спостереження, інструментального контролю, лабораторні та аналітично-розрахункові.

Для очищення викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря від суспендованих твердих частинок не диференційованих за складом, що надходять від місць пересипок грохотів та валкових сит відділення коксортування обладнано двоступеневою (суха та мокра) установкою очистки газу (ГОУ) (рис. 2), яка складається з наступної послідовності технологічного устаткування: розгалужена мережа повітревпроводів з куполами в місцях пиління – група з 4-х циклонів – димосос з електродвигуном 90кВт – щелевий коагулятор – скрубер – димова труба.

За час експлуатації існуючої ГОУ виявлено ряд недоліків, які впливають на надійність роботи обладнання, ефективність очищення викидів від пилу, а також низьку енергоефективність установки в цілому:

1) розгалужена мережа газоходів ускладнює наладку рівномірності розподілу газового потоку;

2) швидке абразивне зношення матеріалу газоходів за рахунок високих швидкостей потоку з наближенням до димососу;

3) надмірні витрати електроенергії для роботи димососу на подолання гідравлічного опору розгалуженої системи газоходів;

4) надмірні витрати електроенергії за рахунок неможливості регулювання кількості задіяного обладнання. Коксортувалка має дві черги, які працюють циклічно по черзі (то одна то друга, одночасна робота неможлива), при цьому ГОУ одна і нероздільна, тобто 40% потужності витрачається на прокачку через ГОУ чистого повітря із робочих зон не працюючого обладнання.

Для проведення вимірювань використовувався аспіратор ASA-4М на локаціях, розташованих поруч з джерелами активного пилоутворення. На час проведення експериментальних вимірювань було відключено ГОУ коксортувалки та виконувались послідовні вимірювання вмісту пилу в повітрі робочих зон (по два вимірювання тривалістю 4 хвилини кожне, в кожній локації, всмоктування повітря зі швидкістю 0,25 м³/с), після завершення циклу вимірювань з відключеною установкою виконано вимірювання за нормальних умов експлуатації, без зміни характеру транспортованого конвеєрами матеріалу, обсягу подачі тощо.

Забирання повітря для виміру виконувалось на відстані 0,5 – 1,0 м від джерел виділення пилу, за допомогою лабораторного обладнання з безпечної для співробітників відстані.

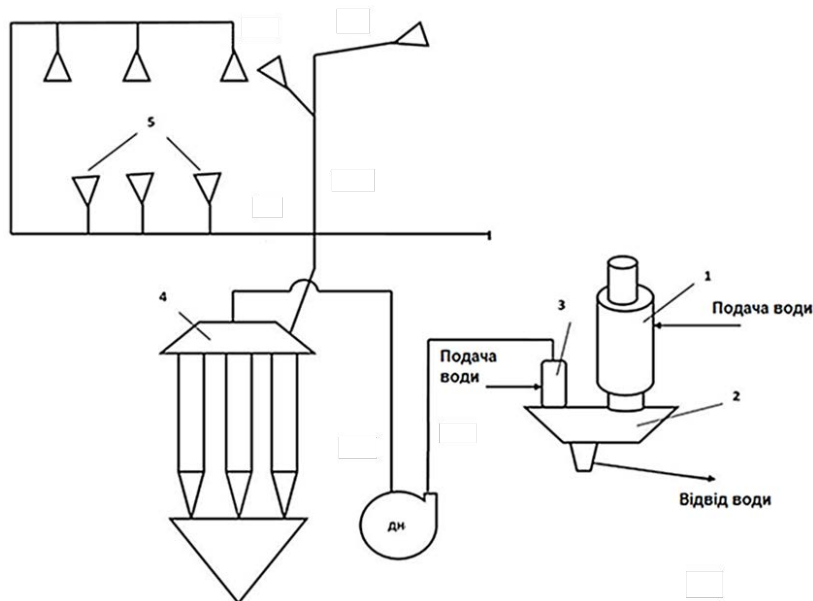


Рис. 2. Схема обладнання ГОУ:

1 – скрубер; 2 – краплеуловлювач; 3 – щелевий коагулятор; 4 – груповий циклон;
5 – система газозондів з прийомними зонтами; ДН – димосос

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Для оцінки ефективності та доцільності роботи аспіраційної установки з газоочисним обладнанням було проведено інструментальне вимірювання вмісту коксового пилу в повітрі робочих зон приміщень коксортувалки, поруч з джерелами активного пилоутворення, а саме: приміщення дробарки, майданчик біля валкового грохоту, майданчик біля вібраційного грохоту, майданчик загального навантажувального жолобу під час роботи установки, та повторне вимірювання в тих самих точках без використання ГОУ за допомогою аспірації ASA-4M.

За результатами вимірювань перевищення концентрації пилу в повітрі робочої зони не виявлено. Вміст пилу у повітрі робочої зони максимально сягав до 0,82 ГДК при працюючому ГОУ дільниці коксортувалки. Без використання ГОУ максимальна концентрація пилу знаходилась на межі досягнення встановленого відповідного нормативного значення. При цьому інструментальне вимірювання було проведено в наступних точках: приміщення дробарки, майданчик біля валкового грохоту, майданчик біля вібраційного грохоту, загальний навантажувальний жолоб.

За результатами інструментальних вимірювань отримано наступне:

- пил крупнодисперсний та легко піддається уловлюванню [18], ГОУ має достатню фактичну ефективність;

- велика кількість пилу перед входом до групового циклону в умовах не значної різниці між концентрацією коксового пилу в повітрі робочих зон під час

роботи ГОУ та з відключеною ГОУ ($\sim 2 \text{ мг/м}^3$) свідчить про значно завищені об'єми аспірації для забезпечення необхідної швидкості газопилового потоку для ефективної роботи циклонів.

- внаслідок завищених об'ємів аспірації винос пилу в газозонди може завищуватись в десятки разів.

- більша частина енергії необхідної для роботи димососу, який забезпечує роботу ГОУ, витрачається на подолання місцевих гідравлічних спротивів газозондів, компенсацію прососів в газозондах, забезпечення швидкості газового потоку необхідної для нормальної роботи циклонів.

- оптимальна швидкість газу на вході в циклон 20-25 м/с, за меншої швидкості недостатня дія відцентрових сил на частинки пилу [18];

- ключову роль у попередженні виходу коксового пилу в робочі зони коксортувалки відіграють укриття осередків пиління та їх якість.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Універсальним способом боротьби з пилом під час перероблення сипучих матеріалів є аспірація, що забезпечує локалізацію пиловиділення за допомогою аспіраційного укриття з подальшим очищенням повітря, що відсмоктується, від пилу. Цей спосіб залишається єдиною можливістю під час знепилювання процесів сортування коксу, оскільки кінцева вологість продукції суворо регламентована.

Довідник з найкращих європейських практик в металургії [2] рекомендує для установок з регулювання гранулометричного складу коксу

(коксортувалок), поєднання двох наступних методів боротьби з викидами в навколишнє середовище: 1) використання закритих будівель для розміщення обладнання або облаштування укрить; 2) ефективне відведення (аспірація) запиленого повітря або газу з подальшим його очищенням від пилу. Рівень викидів, який можливо забезпечити шляхом реалізації таких заходів може складати $<10 \text{ мг/м}^3$ [2].

Оскільки кінцевою метою обладнання коксортувальної установки системою аспірації є забезпечення нормальних умов праці на робочих місцях обслуговуючого персоналу, за умови недопущення понаднормативних викидів в навколишнє середовище, доцільно забезпечити установку аспіраційними пристроями оптимальної продуктивності, тобто щоб забезпечувалась мінімальна витрата аспіраційного повітря під час припинення виділення пилу з укриття. Методики розрахунку оптимальних обсягів аспірації, як правило, доволі умовні [12], оскільки містять деякі сталі показники, які стосуються насамперед сумарної площі розушільнення укриття, тобто оцінюють їх ступінь герметизації.

Успішне розв'язання завдання конструктивного оформлення технічних засобів залежить від повноти врахування конкретних умов ведення технології переробки сипких матеріалів та особливостей експлуатації технологічного обладнання. Оптимізація цих рішень вимагає детального вивчення аеродинамічних процесів формування запиленних потоків повітря, закономірностей утворення пилових частинок і виділення їх з повітря в усіх елементах локалізуючих пристроїв – у жолобах, укриттях і пилоприймальних воронках [4, 19–20]. Зниження початкової концентрації пилу полегшує і здешевлює процеси очищення повітря. Очищення повітря безпосередньо на укриттях підвищує надійність експлуатації системи, зменшує витрати на компенсацію втраченого тиску від прососів, скорочує кількість поверхонь схильних до абразивного зношення та загалом ефективність аспіраційної систем [17, 19].

Під час розроблення технічних засобів необхідно:

- на основі аналізу роботи обладнання, що пилить, його технологічних і конструктивних параметрів, вибрати тип і основні конструктивні елементи аспіраційного укриття;

- на основі врахування аеродинамічного зв'язку укриття і процесів зжекткування повітря в жолобах визначити оптимальну продуктивність місцевих відсмоктувачів і раціональну схему розміщення пилоприймачів;

- на основі аналізу пилоаеродинамічних процесів, вибрати тип і компонування пристроїв для зменшення інтенсивності пиловиділень і попереднього осадження пилу в укриттях і пилоприймачах [17].

З огляду на фізико-хімічні властивості коксового пилу, найбільш цікавою технологією для його

уловлювання в умовах коксортувалки є облаштування місцевих укрить з вбудованими пристроями для відсмоктування та очищення запиленого повітря з подальшим поверненням його в робочу зону.

За доцільне вважається виконувати знепилювання одним із сухих методів, а саме за допомогою рукавних фільтрів, які дозволяють знизити швидкість повітря на вході та, станом на сьогоднішній день, є найбільш прогресивним і дієвим способом боротьби з пилом в промисловому виробництві [19].

У рекомендаціях [2] пропонується використання компактних конвеєрних струменевих фільтрів, які передбачається встановлювати над стрічкою в точці пилоутворення з досягненням значень залишкового пилу $<1 \text{ мг/м}^3$. Відібраний пил рециркулюється безпосередньо у матеріальний потік виробництва. Пилозабірне обладнання поставляється з вбудованим регулятором об'ємної витрати. Окрім ефективного очищення, така технологія очищення пилогазових потоків також дозволяє максимально знизити витрати на електроенергію, оскільки енергія стисненого повітря може бути зменшена більш ніж на 40% [2].

Додатковим конструктивним рішенням, яке може бути використано під час проектування аспіраційної системи та буде враховувати специфіку роботи саме устаткування коксортувалки коксового цеху, може стати не використання додаткових секцій рукавних фільтрів, що зазвичай враховуються для можливості регенерації фільтрувальних елементів, а реалізація регенерації під час циклічних зупинок процесу сортування. Це значно зменшить кінцеві габарити фільтрів.

Для визначення основних параметрів рукавного фільтра використано методику розрахунку, яка детально розглянута Ю.О. Гічовим у [25], з урахуванням її корегування з огляду врахування лише однієї секції у фільтра. Необхідна площа фільтрувальної тканини в рукавному фільтрі визначається втратою тиску газу, яка залежить від швидкості фільтрації, частоти регенерації та низки інших факторів.

Розрахунок виконано для фільтру валкового гуркату «гризлі» І черги.

Рекомендована швидкість фільтрації в рукавному фільтрі з регенерацією шляхом струшування для коксового пилу 0,0117–0,0133 м/с [25].

У фільтрі, що складається з 1 секції, площа фільтрувальної поверхні однієї секції знаходиться за формулою:

$$F_c = \frac{V}{\vartheta_\phi \cdot n}, \text{ м}^2 \quad (1)$$

де V – продуктивність місцевого відсосу, $\text{м}^3/\text{с}$; ϑ_ϕ – швидкість фільтрації, м/с ; n – кількість секцій, шт. Розрахунок виконано для кожного вузла (див. табл. 2).

Після розрахунку площі фільтрувальної поверхні, обираємо відповідний типовий фільтр та визначаємо фактичну швидкість фільтрації:

Таблиця 2. Розрахунок параметрів рукавних фільтрів

Стационарні джерела активного пилоутворення під час роботи коксортувалки	Прийнята продуктивність місцевого пилогазозабірного пристрою, тис. м³/год.	Площа фільтрувальної поверхні однієї секції, м²
Укриття перекачувального вузла з подрібнюючим механізмом I черги	6,00	128,55
Гуркіт «гризлі» I черги з навантажувальним жолобом	8,00	192,83
Вібраційний гуркіт I черги	16,00	364,24
Укриття перекачувального вузла з подрібнюючим механізмом II черги	6,00	128,55
Гуркіт «гризлі» II черги з навантажувальним жолобом	8,00	192,83
Вібраційний гуркіт II черги	16,00	364,24

$$\dot{Q}_\phi = \frac{V + F_c}{F_c \cdot n}, \text{ м/с} \quad (2)$$

Для перевірки вірності вибору фільтру виконується розрахунок втрати тиску у фільтрувальному елементі, які знаходяться за виразом:

$$\Delta_p = \frac{817 \mu \dot{Q}_\phi (1 - m_n)}{d_n^2 m_n^2} \left[0,82 \cdot 10^{-6} \cdot d_n^{0,25} m_n^3 (1 - m_n) h^{0,67} + \frac{Z_1 \dot{Q}_\phi \tau_p}{\rho_n} \right], \text{ Па} \quad (3)$$

де μ – динамічна в'язкість газу за робочих умов, Па·с; m_n – пористість шару пилу, частки од.; d_n – середній розмір частинок пилу, визначений методом повітропроникності, прийнято переважаючий розмір 0,00021 м; m_m – пористість фільтрувальної тканини, частки. од.; h – питомий гідравлічний опір чистої тканини, віднесений до товщини тканини 1 м за швидкості фільтрації повітря 1 м/с, Па. Даний показник не використовується за умови матеріалу фільтрів виготовлених з бавовни; Z_1 – початкова запиленість повітря, кг/м³; τ_p – час між регенераціями, с; ρ_n – щільність коксового пилу, кг/м³.

За результатом перевірконого розрахунку отримано втрати тиску у фільтрувальному елементі 15,1 Па < 1кПа при фактичній швидкості фільтрації до 1,012 м/с, тобто вимога щодо максимальної величини супротиву фільтру виконується.

Аналітичні дослідження підтвердили можливість застосування односекційного рукавного фільтру з регенерацією під час циклічних зупинок в процесі сортування коксу.

При використанні стрічкових конвеєрів потрібно розв'язувати низку проблем, пов'язаних із кількістю стрічок і загальною повною відстанню, на яку має переміщатися матеріал, що переробляється. Інша проблема, що стосується саме стрічкових конвеєрів, – це їхня здатність ставати потужними джерелами пилу під час їхнього завантаження, або коли вони майже порожні. Щоб конвеєри не ставали джерелом пилу, від обслуговуючого персоналу вимагається багато уваги до їхнього технічного стану, своєчасна заміна та ремонт зношених і зруйнованих частин, зокрема й стрічки конвеєра. Під час оглядів

і техобслуговування основна увага має приділятися тому, щоб забезпечити нормальний режим роботи всіх частин системи, необхідний постійний контроль стану укриття, лотків, напрямних, пристроїв для очищення холостої гілки стрічки: оскільки матеріал, який транспортується, може висипатися за межі конвеєра, протертості та інші нещільності укриття, вони стають джерелами забруднення повітря пилом і знижують ефективність роботи системи аспірації [17].

Важливо звести число отворів в укриттях до мінімуму, щоб зберігати сталий рух повітря в середину укриття і попередити вихід пилу назовні, для цього можуть використовуватися (підвісні) пластикові стрічки та інші засоби. Рекомендується робити укриття місць перевантаження досить великими, щоб швидкість руху повітря в (такому) укритті була меншою за 1 м/с (або 200 fpm = 200 футів/хв.) [17]. В укриттях більшого розміру більше місця для заганання і розсіювання повітряних потоків. Якщо укриття буде занадто маленького розміру, то рух повітря всередині такого укриття стимулюватиме витікання забрудненого повітря з укриття назовні, виносячи частинки пилу в повітря робочої зони [17].

Місця перевантаження матеріалу мають бути виконані так, щоб висота вільного падіння була мінімальною, матеріал повинен виконувати вертикальні переміщення по гладким похилим поверхням, для попередження швидкого стирання всі поверхні ковзання коксу мають бути футеровані плитами із литого каменю.

Місця перевантаження матеріалу мають бути такого розміру, щоб це давало змогу матеріалу пересипатися без засмічення та без утворення пробок і засмічень. На основі накопиченого досвіду вважається, що для запобігання засмічень ширина лотка має бути щонайменше втричі більшою за максимальний розмір шматків матеріалу [17]. Запобігання пило-виділенню від обладнання коксортувалки є процесом, що не менш важливий для стану навколишнього середовища і повітря робочих зон персоналу чим справна робота аспіраційного обладнання.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Якість повітря в робочих зонах і повітря, яке скидається, є задовільною, оскільки відповідає встановленим нормативним значенням, але в умовах сучасних тенденцій підвищення вимог щодо якості повітря та показників ресурсо– та енергоефективності виробництва набувають актуальності подальші дослідження вдосконалення систем аспірації та газоочисної установки на дільницях коксортування коксових цехів.

2. Для очищення повітря від пилу, що надходить від місць пересипів грохотів та валкових сит, установку аспірації та очищення газів доцільно модернізувати задля уникнення наступних експлуатаційних недоліків: ускладненої наладки розподілу газового

потoku; схильності газоходів до абразивного зношення; гідравлічного опору розгалуженої системи газоходів; неможливості налаштування системи під фактичні потреби виробничого процесу.

3. Доцільно обмежувати продуктивність аспіраційного пристрою таким чином, щоб припинявся вихід пилу з укриття, та з урахуванням параметрів місцевого пиловсмоктуючого обладнання.

4. При значеннях швидкості повітря, що втягується в укриття зони пиління, більше 1 м/с вихід пилу з цих зон припиняється, а отже дану швидкість можна прийняти як оптимально ефективну при підборі аспіраційного обладнання.

5. Для умов коксортувальної дільниці коксового цеху запропоновано використовувати струменеві рукавні фільтра, встановлені безпосередньо на укриття зон активного пилоутворення.

REFERENCES

- [1] Best available techniques (BAT) reference document for common waste gas management and treatment systems in the chemical sector – Publications Office of the EU. Publications Office of the EU. Retrieved from: <https://doi.org/10.2760/220326> (date of access: 11.06.2024).
- [2] Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production – Publications Office of the EU. Publications Office of the EU. Retrieved from: <https://doi.org/10.2791/97469> (date of access: 11.06.2024).
- [3] Wang, Y., Wang, Y.-y., Zhang, S.-t. (2019). Effect of drying conditions on moisture re-adsorption and particulate matter emissions during the classification drying of coking coal. *Fuel Processing Technology*. Volume 192. 2019. Pages 65-74. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.04.019> (date of access: 11.06.2024).
- [4] Zhang, X., Chen, W., Ma, C., & Zhan, S. (2013). Modeling particulate matter emissions during mineral loading process under weak wind simulation. *Science of The Total Environment*. Volume 449. 2013. Pages 168-173. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.050> (date of access: 11.06.2024).
- [5] Shulha, I.V., Miroshnychenko, D.V. (2022). *Ustatkuvannya pidpriemstv z pererobky tverdykh horiuchykh kopalyn: posibnyk* [Equipment for solid fuels processing enterprises: a guide]. Kharkiv-Ternopil: NTU «KhPI», Vydavnytstvo «Krok», 209 s. [in Ukrainian]
- [6] Pro zatverdzhennia hiihienichnykh rehlementiv dopustymoho vmistu khimichnykh i biolohichnykh rehovyn v atmosferному povitri naselenykh mist [On approval of hygienic regulations for the permissible content of chemical and biological substances in the atmospheric air of populated areas]. Nakaz Ministerstvo okhorony zdorovia Ukrainy vid 14.01.2020 № 52. Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text> (date of access: 11.06.2024). [in Ukrainian]
- [7] Joseck, F., Wang, M., Wu, Y. (2008). Potential energy and greenhouse gas emission effects of hydrogen production from coke oven gas in U.S. steel mills. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33, no. 4. P. 1445–1454. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.10.022> (date of access: 11.06.2024).
- [8] Li Z. et al. (2022). Numerical investigation of coke oven gas (COG) injection into an ironmaking blast furnace (BF). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.036> (date of access: 11.06.2024).
- [9] Zbirnyk pokaznykiv emisii (pytomykh vykydiv) zabrudniuiuchykh rehovyn v atmosferne povitria riznymi vyrobnystvamy [Collection of indicators of emissions (specific emissions) of pollutants into the atmosphere by various industries]. Donetsk: Ukrainyskyi naukovyi tsentr tekhnichnoi ekolohii, 2004. Tom 1. 184 s. Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53404 (date of access: 11.06.2024). [in Ukrainian]
- [10] Modesto, M., & Nebra, S.A. (2009). Exergoeconomic analysis of the power generation system using blast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29, no. 11-12. P. 2127–2136. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.033> (date of access: 11.06.2024).
- [11] Li H., et al. (2010). Energy conservation and circular economy in China's process industries. *Energy*. 2010. Vol. 35, Issue 11. P. 4273–4281. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021> (date of access: 11.06.2024).
- [12] Pravyla tekhnichnoi ekspluatatsii koksokhimichnykh pidpriemstv PTE 2017 [Rules of technical operation of coke and chemical enterprises]. Kharkiv: DP «HYPROKOKS», DP «UKhIN», 2017. 274 p. [in Ukrainian]
- [13] Pro zatverdzhennia normatyviv hranychnodyustymykh vykydiv zabrudniuiuchykh rehovyn iz statsionarnykh dzherel [On approval of standards for maximum permissible emissions of pollutants from stationary sources]: Nakaz Ministerstvo okhorony navkolyshnoho pryrodnoho seredovyshcha Ukraini vid 27.06.2006 № 309. Data pochatku dii 12.08.2006. Retrieved from: <https://ips.ligazakon.net/document/RE12786?an=553> (date of access: 11.06.2024). [in Ukrainian]
- [14] Industrial ventilation: A Manual of Recommended Practice. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc, 1998. 23rd Edition. 514 pp.

- [15] Lió X. et al. (2016). Structural analysis of functional group and mechanism investigation of caking property of coking coal *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. Volume 44. Issue 4. 2016. Pages 385-393. Retrieved from: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(16\)30019-6](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(16)30019-6) (date of access: 11.06.2024).
- [16] Półka, M. (2020). An Analysis of Flammability and Explosion Parameters of Coke Dust and Use of Preliminary Hazard Analysis for Qualitative Risk Assessment. *Sustainability*. Volume 12. Issue 10. 4130. Retrieved from: <https://doi.org/10.3390/su12104130> (date of access: 11.06.2024).
- [17] Cecala, A.B. et al. (2019). Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. Pittsburgh: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Office of Mine Safety and Health Research, 406 pp.
- [18] Severyn, L.I. et al. (2012). Pryrodokhoronni tekhnolohii. Chastyna 1. Zakhyst atmosfery: navchalnyi posibnyk [Environmental technologies. Part 1: Atmospheric protection: a textbook]. Vinnytsia: VNTU, 388 s. [in Ukrainian]
- [19] Cao, Z., Zhou, Y., Cao, S., Wang, Y. (2021). Industrial Ventilation Design Guidebook (Second Edition). Chapter 2. Local ventilation. Editor(s): H. D. Goodfellow, Y. Wang. Academic Press, 2021. Pages 7-108. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816673-4.00006-7> (date of access: 11.06.2024).
- [20] Diao Y., Yang H. (2021). Industrial Ventilation Design Guidebook (Second Edition). Chapter 5. Gas-cleaning technology. Editor(s): H. D. Goodfellow, Y. Wang. Academic Press, 2021. Pages 279-371. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816673-4.00007-9> (date of access: 11.06.2024).
- [21] Ausstattung des Kohlenstaubkomplexes (PUT) für offene AG «ArcelorMittal Kryvyi Rih». *Arma-Gmbh*. Retrieved from: <http://arma-gmbh.de/gasreinigung-und-aspiration-fur-akochemische-produktion-von-amkr/?lang=de> (date of access: 11.06.2024).
- [22] Santacatalina M. et al. (2010). Impact of fugitive emissions in ambient PM levels and composition: A case study in Southeast Spain. *Science of The Total Environment*. Volume 408. Issue 21. 2010. Pages 4999-5009. Retrieved from: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.040> (date of access: 11.06.2024).
- [23] What are the WHO Air quality guidelines? *World Health Organization (WHO)*. Retrieved from: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines> (date of access: 11.06.2024).
- [24] Halai, V.A., Maksymova, N.M. (2023). Ohliad zakhodiv zakhystu atmosfery vid pylu v raionakh rozvytku koksokhimichnoi promyslovosti [Review of dust protection measures in the areas of coke industry development]. *International scientific conference "MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education"*: conference proceedings (November 29 – 30, 2023. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia. Vol. 2. P. 175-178. Retrieved from: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-137> (date of access: 07.06.2024). [in Ukrainian]
- [25] Hichev, Yu.A. (2015). Ochyshchennia haziv [Gas purification]. Dnipropetrovsk: NMetAU, 48 s. [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Best available techniques (BAT) reference document for common waste gas management and treatment systems in the chemical sector – Publications Office of the EU. Publications Office of the EU. URL: <https://doi.org/10.2760/220326> (date of access: 11.06.2024).
- [2] Best available techniques (BAT) reference document for iron and steel production – Publications Office of the EU. Publications Office of the EU. URL: <https://doi.org/10.2791/97469> (date of access: 11.06.2024).
- [3] Wang Y., Wang Y.-y., Zhang S.-t. (2019) Effect of drying conditions on moisture re-adsorption and particulate matter emissions during the classification drying of coking coal. *Fuel Processing Technology*. Volume 192. 2019. Pages 65-74. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2019.04.019> (date of access: 11.06.2024).
- [4] Zhang X., Chen W., Ma C., Zhan S. (2013) Modeling particulate matter emissions during mineral loading process under weak wind simulation. *Science of The Total Environment*. Volume 449. 2013. Pages 168-173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.050> (date of access: 11.06.2024).
- [5] Шульга І. В. (2022). Устаткування підприємств з переробки твердих горючих копалин: посібник / І.В. Шульга, Д.В. Мірошниченко. Харків-Тернопіль: НТУ «ХПІ», Видавництво «Крок», 209 с.
- [6] Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин в атмосферному повітрі населених місць. Наказ Міністерство охорони здоров'я України від 14.01.2020 № 52. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0156-20#Text> (дата звернення: 11.06.2024).
- [7] Joseck F., Wang M., Wu Y. (2008) Potential energy and greenhouse gas emission effects of hydrogen production from coke oven gas in U.S. steel mills. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2008. Vol. 33, no. 4. P. 1445–1454. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.10.022> (date of access: 11.06.2024).
- [8] Li Z. et al. (2022) Numerical investigation of coke oven gas (COG) injection into an ironmaking blast furnace (BF). *International Journal of Hydrogen Energy*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.036> (date of access: 11.06.2024).
- [9] Збірник показників емісії (питомих викидів) забруднюючих речовин в атмосферне повітря різними виробництвами. Донецьк: Український науковий центр технічної екології, 2004. Том 1. 184 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53404 (дата звернення: 11.06.2024).
- [10] Modesto M., Nebra S.A. (2009). Exergoeconomic analysis of the power generation system using blast furnace and coke oven gas in a Brazilian steel mill. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29, no. 11-12. P. 2127–2136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.12.033> (date of access: 11.06.2024).

- [11] Li H., et al. (2010). Energy conservation and circular economy in China's process industries. *Energy*. 2010. Vol. 35, Issue 11. P. 4273–4281. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.021> (date of access: 11.06.2024).
- [12] Правила технічної експлуатації коксохімічних підприємств ПТЕ 2017. Харків: ДП «ГИПРОКОКС», ДП «УХІН», 2017. 274 с.
- [13] Про затвердження нормативів граничнодопустимих викидів забруднюючих речовин із стаціонарних джерел: Наказ Міністерство охорони навколишнього природного середовища України від 27.06.2006 № 309. Дата початку дії 12.08.2006. URL: <https://ips.ligazakon.net/document/RE12786?an=553> (дата звернення: 11.06.2024).
- [14] Industrial ventilation: A Manual of Recommended Practice. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc, 1998. 23rd Edition. 514 pp.
- [15] Li X. et al. (2016). Structural analysis of functional group and mechanism investigation of caking property of coking coal *Journal of Fuel Chemistry and Technology*. Volume 44. Issue 4. 2016. Pages 385-393. URL: [https://doi.org/10.1016/S1872-5813\(16\)30019-6](https://doi.org/10.1016/S1872-5813(16)30019-6) (date of access: 11.06.2024).
- [16] Półka M. (2020). An Analysis of Flammability and Explosion Parameters of Coke Dust and Use of Preliminary Hazard Analysis for Qualitative Risk Assessment. *Sustainability*. Volume 12. Issue 10. 4130. URL: <https://doi.org/10.3390/su12104130> (date of access: 11.06.2024).
- [17] Cecala A.B. et al. (2019). Dust Control Handbook for Industrial Minerals Mining and Processing. Pittsburgh: Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, Office of Mine Safety and Health Research, 406 pp.
- [18] Природоохоронні технології. Частина 1. Захист атмосфери: навчальний посібник / Л. І. Северин, В. Г. Петрук, І. І. Безвозюк, І. В. Васильківський. Вінниця: ВНТУ, (2012). 388 с.
- [19] Cao Z., Zhou Y., Cao S., Wang Y. (2021). Industrial Ventilation Design Guidebook (Second Edition). Chapter 2. Local ventilation. Editor(s): H. D. Goodfellow, Y. Wang. Academic Press, 2021. Pages 7-108. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816673-4.00006-7> (date of access: 11.06.2024).
- [20] Diao Y., Yang H. (2021). Industrial Ventilation Design Guidebook (Second Edition). Chapter 5. Gas-cleaning technology. Editor(s): H. D. Goodfellow, Y. Wang. Academic Press, 2021. Pages 279-371. URL: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816673-4.00007-9> (date of access: 11.06.2024).
- [21] Ausstattung des Kohlenstaubkomplexes (PUT) für offene AG «ArcelorMittal Kryvyi Rih». *Arma-Gmbh*. URL: <http://arma-gmbh.de/gasreinigung-und-aspiration-fur-akochemische-produktion-von-amkr/?lang=de> (date of access: 11.06.2024).
- [22] Santacatalina M. et al. (2010). Impact of fugitive emissions in ambient PM levels and composition: A case study in Southeast Spain. *Science of The Total Environment*. Volume 408. Issue 21. 2010. Pages 4999-5009. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.040> (date of access: 11.06.2024).
- [23] What are the WHO Air quality guidelines? *World Health Organization (WHO)*. URL: <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines> (date of access: 11.06.2024).
- [24] Галай В. А., Максимова Н. М. (2023). Огляд заходів захисту атмосфери від пилу в районах розвитку коксохімічної промисловості. *International scientific conference "MININGMETALTECH 2023 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education"*: conference proceedings (November 29 – 30, Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia, 2023. Vol. 2. С. 175-178. URL: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-137> (date of access: 11.06.2024).
- [25] Гічев Ю.А. (2015). Очищення газів. Дніпропетровськ: НМетАУ, 48 с.

© Галай В. А., Максимова Н. М.

Дата надходження статті до редакції: 13.06.2024

Дата затвердження статті до друку: 02.07.2024