

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**ДАРМОФАЛ ЕЛЕОНОРА АНАТОЛІЇВНА**



УДК 504.3 [622.451/622.612] (043.3/5)

**ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА АТМОСФЕРНЕ  
ПОВІТРЯ ШЛЯХОМ ФІЛЬТРАЦІЇ ШАХТОВИХ ВИКИДІВ**

Спеціальність 21.06.01– екологічна безпека

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Суми – 2021

**Дисертація є кваліфікаційною науковою працею на правах рукопису.**

Робота виконана на кафедрі охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету ім. В. Н. Каразіна.

**Науковий керівник –** доктор технічних наук, професор  
**Адаменко Микола Ігорович,**  
Уманський національний університет  
садівництва  
Міністерство освіти і науки України

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Пономаренко Роман Володимирович,**  
Національний університет цивільного захисту  
України  
Державної служби України з надзвичайних  
ситуацій,  
заступник начальника кафедри пожежної та  
рятувальної підготовки, м. Харків

доктор технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Вакал Сергій Васильович,**  
Сумський державний університет  
Міністерства освіти і науки України,  
директор Науково-дослідного інституту  
мінеральних добрив і пігментів, м. Суми

Захист відбудеться 07 травня 2021 р. об 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 у Сумському державному університеті за адресою: 40007, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2, корп. Ц, ауд. 204.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Сумського державного університету за адресою: 40007, Україна, м. Суми, вул. Римського-Корсакова, 2 та на сайті спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04 за електронною адресою: <http://sumdu.edu.ua/ukr/scientific/scientific-council/32-scientific/scientific-council/5367.html>

Автореферат розісланий 07 квітня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 55.051.04



Л.Л. Гурець

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Однією з найважливіших і злободенних небезпек сьогодення є проблема забруднення атмосферного повітря, яка давно набула глобального значення в екологічному та економічному аспектах.

Забруднене повітря негативно впливає на здоров'я людей, що проявляється через зростання захворюваності, скорочення середньої тривалості життя, збільшення кількості передчасних смертей та справляє негативний вплив на рівень працездатності населення. Екологічна ситуація в районах проведення гірничих робіт в Україні на сьогодні є досить складною та небезпечною. Тільки впровадження природоохоронних заходів, поряд з раціональним природокористуванням, можуть привести до зміни екологічної ситуації, зниження концентрації шкідливих речовин в атмосферному повітрі.

Особлива увага приділяється питанню підвищення ризику глобального забруднення атмосфери Землі, значну частку у зміну якого вносять регіони проведення гірничих робіт. На сьогоднішній день перелік генерованих вугільними шахтами екологічних проблем для атмосферного повітря значний, до основних можна віднести: викиди отруйних речовин (формальдегід, діоксид азоту, фенол, бенз(а)пірен, фтороводень, оксид вуглецю, завислі речовини); викиди парникових газів та твердих часточок; випаровування летких отруйних речовин із відстійників; пилове забруднення (здування отруйних речовин із золо-, шлако- і шламовідвалів, териконів); забруднення атмосферного повітря викидами від стаціонарних та пересувних джерел (золою від ТЕЦ, формальдегідами, діоксидом азоту та ін.); забруднення повітря внаслідок діяльності підприємств нафтогазового комплексу та під час спалювання газу у факелах; транскордонне перенесення забруднювальних речовин повітрям у прикордонних областях.

Ця тема досить широко обговорюється в науковій літературі й відображена в багатьох законодавчих та нормативно-правових актах України. Найважливішою частиною вищезазначеної проблеми є вирішення завдань щодо досягнення максимально високого ступеня очищення екологічно небезпечних вентиляційних викидів вугільних шахт.

Враховуючи вищезазначене, виникає необхідність у створенні більш ефективних фільтруючих систем у порівнянні з тими, які нині застосовуються в гірничій промисловості. Вирішенню цієї проблеми присвячені праці таких вітчизняних та зарубіжних науковців, як Т.П. Волкова, Ю.П. Волков, Л.Л. Гурець, В.Н. Дихановський, М.А. Ємець, П.І. Копач, В.Є. Колесник, А.В. Павличенко, А.В. Русанов, М.І. Суханов, P.S. Abhishek, P.N. Ramachandran.

Очищення пилових шахтових викидів від різного роду домішок (твердих частинок, крапель, диму та ін.) є актуальним науковим завданням в діяльності гірничо-видобувних підприємств, а також у питаннях захисту навколишнього природного середовища. До основних вимог, що висуваються до апаратів пилоочищення, належить їх висока експлуатаційна надійність і достатня ефективність очищення. Чим дрібніші частки пилу вловлюються і чим вищим є ступінь очищення газів, тим більшими є питомі капітальні витрати на спорудження таких установок та витрати на їх утримання й експлуатацію. Все

вищезазначене є актуальною науково-прикладною задачею та дозволило сформулювати мету й завдання дослідження.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Основні завдання дисертаційної роботи щодо постановки задачі досліджень, методів і засобів їх розв'язання відповідають Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», Постанові Верховної Ради України «Про Основні напрями державної політики України у галузі охорони навколишнього природного середовища, використання природних ресурсів та забезпечення екологічної безпеки» та Концепції Загальнодержавної програми поводження з відходами на 2013-2020 рр.

Основні дослідження роботи проводилися у межах виконання плану науково-дослідних робіт кафедри охорони праці та безпеки життєдіяльності Харківського національного університету ім. В.Н. Каразіна за тематикою «Підвищення рівня екологічної безпеки територій у зоні шахтових викидів», згідно з науково-технічною програмою Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер 0116U008943) на 2016-2018 рр., в якій автор брав участь як відповідальний виконавець.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення рівня екологічної безпеки атмосферного повітря регіонів у зоні впливу шахтових викидів шляхом їх фільтрації.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні завдання:

- провести аналіз стану екологічної безпеки атмосферного повітря в районах проведення гірничих робіт;
- проаналізувати методи розрахунку концентрації домішок від точкових джерел викидів за різних умов експлуатації шахт;
- запропонувати найбільш раціональні режими очищення забрудненого пилом шахтового повітря при його викидах в атмосферне повітря;
- створити інформаційну модель поширення забруднення в атмосферному повітрі, яка б дозволяла прогнозувати розподіл концентрації забруднювача у просторі та часі практично для будь-яких можливих надзвичайних ситуацій;
- теоретично дослідити та експериментально визначити розмір частинок основної маси шахтового пилу, з метою визначення його концентрації на межі санітарно-захисних зон шахт;
- розробити й експериментально перевірити комбіновану систему фільтраційного очищення екологічно небезпечних вентиляційних шахтових викидів.

*Об'єкт дослідження* – процес техногенного забруднення атмосферного повітря шахтовими викидами.

*Предмет дослідження* – підвищення рівня екологічної безпеки регіону шляхом фільтрації шахтового повітря.

**Методи дослідження.** Теоретичні аспекти дисертаційної роботи ґрунтуються на системному підході до вирішення проблеми оцінювання впливу

шахових викидів на атмосферне повітря регіону. Дослідження проводились з використанням математичного моделювання, планування проведення експериментів, аналітичних й експериментальних методів визначення впливу параметрів, що визначають екологічну безпеку атмосферного повітря в районах шахтових викидів. Під час проведення експериментальних досліджень застосовувалися стандартні методи визначення хімічних речовин. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою багатоплатформового, вільно розповсюджуваного офісного пакету з відкритим вихідним кодом LibreOffice.

#### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- вперше визначено, що методи розрахунку концентрації домішок від точкових джерел викидів за різними умовами експлуатації мають обмежену зону застосування, що потребує створення універсального методу розрахунку, єдиного для різних типів джерел;
- вперше створено інформаційну модель визначення поширення забруднення атмосферного повітря шахтовими викидами із заданими початковими та граничними умовами, що дозволяє прогнозувати розподіл концентрації забруднюючих речовин у просторі та часі практично для будь-яких можливих надзвичайних ситуацій;
- вперше науково обґрунтовано та експериментально підтверджено спосіб очищення екологічно небезпечних вентиляційних викидів шахтових комплексів шляхом створення комбінованих систем фільтрації;
- удосконалено систему визначення екологічно небезпечного впливу гірничої промисловості на навколишнє природне середовище за найбільш імовірними напрямками.

**Практичне значення одержаних результатів.** Розроблено й експериментально перевірено комбіновану систему фільтрації очищення екологічно небезпечних вентиляційних шахтових викидів. Запропоновано найбільш раціональні режими очищення забрудненого пилом шахтового повітря при його викидах в атмосферу. Створено інформаційну модель визначення поширення забруднення атмосферного повітря шахтовими викидами із заданими початковими та граничними умовами, які дозволяють прогнозувати розподіл концентрації забруднюючих речовин у просторі та часі практично для будь-яких можливих надзвичайних ситуацій. Зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря шляхом фільтрації шахтових викидів дозволило досягти уловлювання дрібнодисперсних фракцій пилу (1–10 мкм) у шахтових викидах, шляхом застосування на другій стадії очищення шахтового повітря динамічного фільтра з ефективністю видалення дрібнодисперсних часток на 95–99%.

Результати дисертаційних досліджень у розділі дослідно-промислових випробувань розробленої комбінованої системи фільтрації екологічно небезпечних вентиляційних шахтових викидів було впроваджено у діяльність виробничого структурного підрозділу (далі – ВСП) «Шахтоуправління Дніпровське» приватного акціонерного товариства (далі – ПрАТ) «ДТЕК Павлоградвугілля» «Шахта імені М.І. Сташкова» (акт впровадження від

21.11.2017 р.) та у діяльність ВСП «Шахтоуправління Дніпровське» ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» «Шахта «Дніпровська» (акт впровадження від 07.02.2018 р.).

Результати дисертаційних досліджень упроваджено у навчальний процес Навчально-наукового інституту екології Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна під час підготовки і викладання навчальної дисципліни «Екологічна безпека» (акт впровадження від 17.02.2021 р.).

**Особистий внесок здобувача** полягає у проведенні критичного аналізу стану проблеми екологічної безпеки атмосферного повітря в районах проведення гірничих робіт, створенні експериментальних установок, розробці й апробації методики експериментального дослідження, обробці та узагальненні математичних даних.

Наукові результати, які викладені в дисертаційній роботі, отримані особисто автором, а саме: розроблено і експериментально перевірено комбіновану систему фільтрації очищення екологічно небезпечних вентиляційних шахтових викидів.

Вибір теми дисертаційної роботи, постановка завдань дослідження, обговорення одержаних результатів були проведені разом із науковим керівником – доктором технічних наук, професором М.І. Адаменко. Внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, наведено у списку праць за темою дисертації.

**Апробація результатів роботи.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових і науково-практичних конференціях, а саме на: VI Всеукраїнському науковому семінарі «Методи підвищення ресурсу інженерних інфраструктур» (м. Харків, 2014); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні напрями рекреації, фізичної реабілітації та оздоровчих технологій» (м. Харків, 2014); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств управления» (Полтава – Баку – Белгород – Кіровоград – Харків, 2014); V Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління» (м. Харків, 2015); II Міжнародній науково-практичній конференції «Наукові розробки, передові технології, інновації» (м. Харків, 2016); V Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми інформатизації» (Черкаси – Баку – Бельсько-Бяла – Полтава, 2017); Міжнародній науково-технічній конференції «Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу» (м. Харків, 2018); Десятій Міжнародній науково-технічній конференції «Динамічна модель розповсюдження атмосферних забруднень на базі результатів екомоніторингу» (Баку – Харків – Жиліна, 2020).

**Публікації.** За результатами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових праць: 8 статей, зокрема 6 – у фахових виданнях, що входять до переліку МОН України, 1 – у спеціалізованому закордонному виданні, 1 – в інших виданнях, 8 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 189 сторінок, з яких 129 сторінок основного тексту. Дисертація містить 32 рисунки та 4 таблиці за текстом. Список використаних джерел містить 123 найменування на 13 сторінках. Вісім додатків розміщені на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи; сформульовано мету, завдання досліджень; відображено наукову новизну, практичну цінність отриманих результатів та особистий внесок здобувача.

**Перший розділ** присвячений вивченню екологічної ситуації навколо гірничо-видобувних підприємств з метою обґрунтування й розробки заходів задля її поліпшення, аналізу даних науково-технічної літератури щодо основних забруднювачів повітря в районах проведення гірничих робіт та огляду систем пилоочищення, які застосовуються для боротьби з вугільним пилом.

Вплив потенційно небезпечних об'єктів на навколишнє природне середовище та додержання нормативів шкідливих викидів у районах проведення гірничих робіт досліджували вітчизняні та закордонні науковці: Білецький В.С., Войцицький А.П., Дубровський В.П., Боголюбов В.М., Півняк Г.Г., Табаченко М.М., Дичковський Р.О., Фальштинський В.С., G. Tyler Miller, Living I.R., Burenin V.V. та інші. Проблема техногенно-екологічної безпеки районів проведення гірничих робіт загострюється тим, що викиди в атмосферне повітря здійснюються переважно у промислових зонах, де має місце велика концентрація гірничо-видобувних підприємств та іншої промисловості.

Одним з головних напрямів зниження негативного впливу вугільної промисловості є заходи стабілізації та поліпшення стану навколишнього природного середовища шляхом фільтрації шахтових пилових викидів. Пилоподібні викиди, які потрапляють до атмосферного повітря, мають найбільшу можливість поширення та безпосередньо розподіляються за ознаками їх агрегатного стану, походження та місця утворення. При цьому до них належать як самовільні викиди, викиди з вентиляційних стовбурів шахт, так і ті, що утворюються у разі виникнення різних несприятливих надзвичайних ситуацій.

Останнім часом відзначається поступове нарощування виробничих потужностей гірничо-видобувних підприємств, що призводить до посилення негативного впливу потенційно небезпечних об'єктів на навколишнє природне середовище. Ситуація ускладнюється тим, що недосконалість системи фільтрації шахтових викидів впливає на підвищення рівня техногенно екологічної безпеки шахтових регіонів України, що свідчить про необхідність удосконалення заходів стабілізації та поліпшення стану навколишнього природного середовища, а також створення надійних систем спостереження за викидами та забезпечення їх безаварійної роботи.

Результати аналізу екологічного стану атмосферного повітря забруднених зон шахтових регіонів свідчать про те, що можливість зниження шахтових викидів за допомогою покращення інфільтрації пилоподібних викидів в окремих регіонах значно покращить стан атмосферного повітря на усій території України.

Таким чином, задля створення ефективних умов безпечної життєдіяльності людини доцільною є розробка способів очищення екологічно небезпечних вентиляційних викидів шахтових комплексів шляхом створення комбінованих систем фільтрації.

У другому розділі описано об'єкт і методи дослідження, методику розрахунку концентрацій в атмосферному повітрі шкідливих речовин, методики проведення експериментальних досліджень, дано оцінку надійності результатів експериментів, методику експериментальної перевірки ефективності пристроїв уловлювання дрібнодисперсних часток пилу.

Найбільша кількість домішок випадає на деякій відстані від джерела викиду за рахунок перенесення, що пояснюється високою інерційністю дрібнодисперсного пилу, частинки якого підхоплюються та переносяться з потоком вітру на значно більшу відстань, або навіть за межі санітарно-захисної зони, на відміну від крупнодисперсного. Кількість та об'єми газових домішок при проведенні розрахунків є не репрезентативними. Тому при розробці дієвих заходів щодо найбільш раціональних режимів зниження забруднення атмосферного повітря шахтовими викидами, розглядався шахтовий пил.

На прикладі Дніпропетровської області розглянуто вплив техногенного навантаження на навколишнє природне середовище від шахтових викидів в атмосферне повітря гірничо-видобувними підприємствами.

Шаховий пил розглянуто як систему зважених часток у повітрі, які між собою не взаємодіють. Тому, рух окремо взятої частинки описується рівнянням Ланжевена:

$$M \frac{\partial v}{\partial t} = -bv - Mg + \rho_0 Vg + f_{st}, \quad (1)$$

де величина  $M = \rho V$  – маса частинки;  $V = 4\pi R^3/3$  – об'єм;  $\rho$  – щільність частинки, г/см<sup>3</sup>; величина  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння, а  $\rho_0$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $f_{st}$  – випадкова сила, яка діє на частинку та пов'язана з Броунівським рухом молекул, Н.

Для спрощення обмежувалися розглядом руху частинок по вертикалі.

Перший доданок в (1) визначає собою силу тертя, і коефіцієнт тертя  $b$ , з одного боку, пов'язаний з коефіцієнтом дифузії  $D$  за допомогою співвідношення Ейнштейна:

$$D = \frac{k_B T}{b}, \quad (2)$$

де  $D$  – коефіцієнт дифузії;  $k_B$  – постійна Больцмана (фізична стала, що визначає зв'язок між температурою й енергією  $k_B = 1,380649 \times 10^{-23}$  Дж/К);  $T$  – абсолютна температура;  $b$  – коефіцієнт тертя.

А з іншого боку, для сферичних частинок коефіцієнт тертя визначається за формулою Стокса:



$$b = 6\pi\eta R, \quad (3)$$

де величина  $\eta$  – в'язкість повітря;  $R$  – радіус.

Другий і третій доданки в рівнянні (1) визначаються наявністю поля тяжіння і відповідають силі тяжіння і силі Архімеда. Останній доданок описує внесок випадкових зіткнень молекул повітря з частинкою і представлений як випадкова сила.

Рівняння (1) дозволяє вивести так зване рівняння Фоккера–Планка для функції розподілу частинок за швидкостями  $h = h(z, v)$ :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + v \frac{\partial h}{\partial z} - Mg \frac{\partial h}{\partial v} = \frac{b}{T} \frac{\partial}{\partial v} \left\{ \frac{k_B T}{M} v \frac{\partial h}{\partial v} + h \right\}. \quad (4)$$

Розв'язання рівняння відображатиме в цілому еволюцію пилу в межах поля тяжіння з урахуванням дифузії.

Задля визначення екологічного впливу шахтових викидів на атмосферне повітря регіону й розробки ефективних заходів стабілізації та поліпшення стану навколишнього природного середовища, в першу чергу, необхідно було визначити середні концентрації пилу у цих викидах та їх дисперсний склад.

Концентрацію пилу в шахтових викидах визначали ваговим методом, оснований на визначенні збільшення ваги фільтру, через який проходить визначений об'єм повітря, що досліджується.

Схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

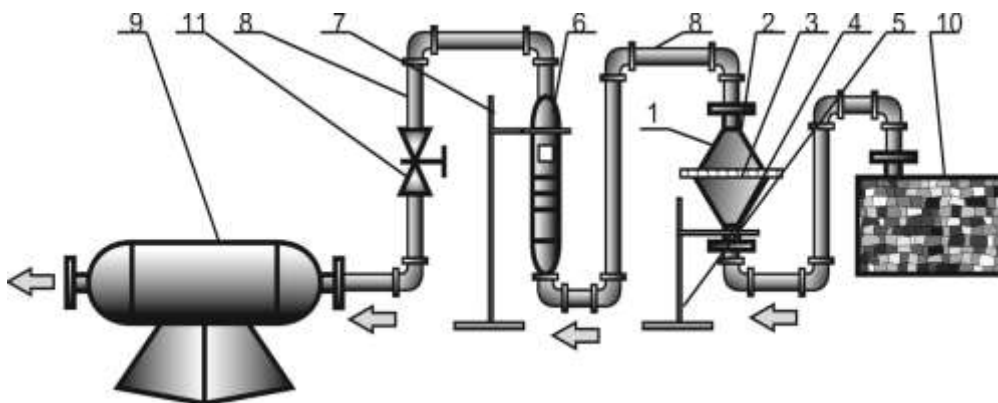


Рисунок 1 – Схема лабораторної експериментальної установки для визначення запиленості атмосферного повітря шахтовими викидами:

1 – фільтр; 2 – верхня кришка фільтра; 3 – фільтруючий елемент; 4 – нижня частина фільтра; 5 – штатив з утримувачем; 6 – ротаметр; 7 – штатив з утримувачем; 8 – з'єднувальна трубка; 9 – пилосос; 10 – оголовок шахтового викиду; 11 – гвинтовий затискач

У дослідженнях виходили з того, що функція логарифмічно-нормального розподілу маси часток за діаметрами часток має вигляд:

$$D(\delta) = \frac{100}{\sqrt{2\pi \lg \sigma}} \int_{-\infty}^{\lg \delta} e^{-\frac{(\lg \delta - \lg \delta_{50})^2}{2 \lg^2 \sigma}} d \lg \delta, \quad (5)$$

де  $\delta_{50}$  – медіана розподілу маси часток, що являє собою такий розмір часток, за яким уся маса пилу розділяється на дві рівні частини (тобто маса усіх часток

менша  $\delta_{50}$ , так само, як і маса усіх часток, більша  $\delta_{50}$ , становить 50% загальної маси матеріалу);

$\lg \sigma$  – стандартне (середньоквадратичне) відхилення логарифмів діаметрів від їх середнього значення  $\bar{\delta}$  :

$$\lg \sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (\lg \delta_i - \lg \bar{\delta})^2}, \quad (6)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta_i,$$

де  $N$  – кількість часток;

$\delta_i$  – розмір (діаметр)  $i$ -ї частки.

Інтеграл, що входить у рівняння (5) не може бути виражений через елементарні функції. Для розрахунку цієї функції її перетворюють у функцію нового аргументу  $t$ :

$$t = \frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma}. \quad (7)$$

Після підстановки формули (7) у рівняння (5) отримаємо функцію аргументу  $t$ :

$$D(\delta) = F(t) = F\left(\frac{\lg \delta - \lg \delta_{50}}{\lg \sigma}\right) = \frac{100}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (8)$$

яка зветься нормованою функцією нормального розподілу.

Результати експериментів обробляли відповідно до рекомендацій Міжнародного Союзу чистої та прикладної хімії (ІНПАК) за методами визначення й формою позначення помилок і відхилень, одержуваних у процесі масових аналітичних досліджень.

Процес вважається відтвореним, якщо будь-яке значення Кохрена, отримане розрахунковим шляхом за даними експериментів, менше його табличного значення.

Обробку експериментальних даних виконували за допомогою багатоплатформового, вільно розповсюдженого офісного пакету з відкритим вихідним кодом LibreOffice.

Для аеродинамічного розрахунку пристрою використовувався програмний комплекс FlowER, оснований на численному інтегруванні осереднених за Фавром рівнянь Навьє–Стокса, для замкнення яких було застосовано двопараметричну модель турбулентності переносу здвигових напружень.

При розрахунку в повітряному потоці твердих часток пилу було зроблено припущення, що вони не впливають на характеристики течії. Таке припущення є виправданим для умов, що розглядаються, коли концентрація пилу є невеликою, а розмір часток – малим (1–10 мкм). Для визначення траєкторії руху твердих часток застосовувалася методика, що основана на інтегруванні за часом рівнянь руху Ньютона з урахуванням усіх діючих сил (аеродинамічний опір, сила тяжіння, відцентрова і каріолісова сили тощо).

**Третій розділ** присвячений інформаційно-розрахунковій системі поширення атмосферного забруднення та його мінімізації.

Максимального значення приземної концентрації шкідливих речовин  $c_m$  (мг/м<sup>3</sup>) з одиночного точкового джерела при викиді газоповітряної суміші на відстані  $x_m$  (м) в несприятливих метеорологічних умовах можна розрахувати за формулою (9):

$$C_m = \frac{AMFmnq}{H^2 \sqrt[3]{V_1 \Delta T}}, \quad (9)$$

де  $A$  – безрозмірний коефіцієнт, який залежить від температури атмосфери;  $M$  – маса шкідливих речовин, які знаходяться в атмосфері за 1 одиницю часу, кг/год.;  $F$  – безрозмірний коефіцієнт, який враховує швидкість осідання в атмосферному повітрі небезпечних речовин;  $m$  та  $n$  – безрозмірні коефіцієнти, які враховують умови виходу газової та повітряної суміші з джерела викиду;  $H$  – висота джерела викидів над рівнем землі ( $H = 2$  для неземних джерел при розрахунку), м;  $\eta$  – коефіцієнт, який враховує вплив рельєфу місцевості ( $\eta = 1$  у випадку слабопересіченої або рівної місцевості та у разі перепаду висоти, який не перевищує 50 м на 1 км), м/км;  $\Delta T$  – різниця між температурами навколишнього середовища  $T_e$ , °C, та газоповітряної суміші  $T_z$ , °C;  $V_1$  – витрати газоповітряної суміші, м<sup>3</sup>/с, які визначаються на основі формули  $v_1 = \frac{\pi D^2}{4} \omega_0$ , де  $D$  – діаметр гирла джерела викиду, в м;  $\omega_0$  – середня швидкість виходу з гирла джерела викиду газоповітряної суміші, м/с.

Розглянуте завдання про седиментацію передбачає осідання частинок пилу при дії гравітаційного поля. Для великих частинок пилу ( $R > 100$  мкм) вихід на стаціонарний режим не відбувається. Ці частинки осідають в полі тяжіння з наростаючою швидкістю та зменшеним прискоренням.

Частинки, що менші за розміром ( $R < 100$  мкм), виходять на стаціонарний режим падіння, або на режим із постійною сталою швидкістю. Для них розв'язок рівняння (10) дає змогу вивести рівняння дифузії в полі тяжіння – рівняння Смолуховського:

$$\frac{dn}{dt} = D \frac{d}{dz} \left\{ \frac{dn}{dz} + \frac{Mg}{k_B T} n \right\}. \quad (10)$$

Тут  $n = n(z)$  – кількість частинок в одиниці об'єму.

$$n(z) = \int h(v, z) dv. \quad (11)$$

Рівняння (12) виступає головним під час розв'язання поставлених задач та дає змогу визначити просторову та часову еволюцію системи частинок з певним ступенем точності на зовнішньому полі. Це рівняння зручно переписати в такому вигляді:

$$\frac{dn}{dt} = D \frac{d^2 n}{dz^2} + c \frac{dn}{dz} = \frac{k_B T}{b} \frac{d^2 n}{dz^2} + \frac{Mg}{b} \frac{dn}{dz}. \quad (12)$$

Рівняння у такому вигляді дає змогу виділити два доданки, що відповідають за різні фізичні механізми. Перший – за рахунок дифузії відбувається розмивання з коефіцієнтом дифузії  $D = \frac{k_B T}{6\pi\eta R}$ .

Другий доданок відображає «дрейф» або «знесення» – спрямований рух за рахунок сталої швидкості зовнішньої сили  $c = \frac{Mg}{b} = \frac{2}{9} \frac{\rho R^2 g}{\eta}$ .

Конкуренція зазначених механізмів являє собою еволюцію системи часток. При цьому розмір частинок визначає відносний внесок кожного механізму. Частинки великих розмірів ( $R > 100$  мкм) будуть мати велику постійну швидкість руху вниз, частинки маленьких розмірів ( $R < 100$  мкм) – повільну дифузію в атмосферному повітрі.

Зробимо припущення щодо початкового моменту, коли всі частинки були на певній висоті  $z_0$ , тобто рівняння матиме такий вигляд (13):

$$n(z, t = 0) = n_0 d \delta(z - z_0), \quad (13)$$

де  $d$  – товщина шару;  $n_0$  – значення щільності на момент початку;  $\delta(z)$  – функція Дірака.

За граничну умову вибираємо вимогу рівності нулю на границі потоку частинок (14)

$$j(z = 0, t) = D \frac{\partial n}{\partial z} + cn = 0. \quad (14)$$

Розв'язання цієї задачі має вигляд (15):

$$n(z, t) = \frac{n_0 d}{2\sqrt{\pi D t}} \left\{ \exp\left(-\frac{(z - z_0)^2}{4Dt}\right) + \exp\left(-\frac{(z + z_0)^2}{4Dt}\right) \right\} \times \\ \times \exp\left[-\frac{c}{2D}\left(z - z_0 + \frac{ct}{2}\right)\right] + \frac{cn_0 d}{2D} \exp\left(-\frac{cz}{D}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{z - z_0 - ct}{\sqrt{4Dt}}\right), \quad (15)$$

де  $\operatorname{erfc}(x)$  – інтеграл помилок.

Характерні залежності від висоти в певні моменти часу представлені на рис. 2.

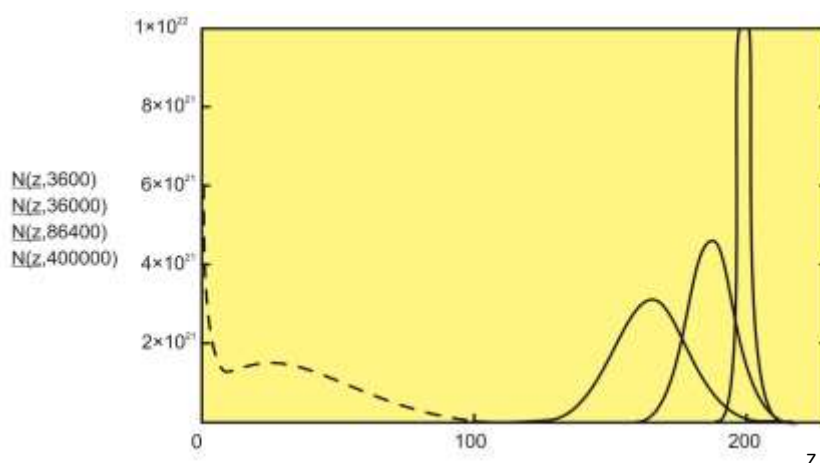


Рисунок 2 – Приклад просторового розподілення пилу в різні моменти часу

В результаті розв'язання поставленої задачі було визначено кількісні межі режиму еволюції пилу в полі тяжіння. Отримано рівняння, що описують еволюцію частинок пилу довільного розміру.

Основним висновком є той факт, що очищення забрудненого шахтового повітря при викидах його в атмосферне необхідно проводити у два етапи. Якщо на першому проводити очищення від частинок пилу великих розмірів, то на другому – від дрібних, тим більше, що саме ці частки становлять найбільшу небезпеку для дихальних шляхів робітників та населення в цілому.

**Четвертий розділ** було присвячено теоретичному обґрунтуванню комбінованих систем фільтрації шахтових викидів в атмосферне повітря гірничо-видобувними підприємствами.

Запропоновано новий високоефективний небар'єрний принцип очищення газової суміші шахтових викидів від дрібнодисперсних часток, що базується на активному способі очищення. Фільтри з активним способом очищення відносять до механічних («сухих») пиловловлювачів, що використовують принцип роботи, оснований на дії відцентрових сил.

Дрібні часточки твердої речовини можна умовно розділити за розмірами на грубодисперсні та мікрогетерогенні. Механічне очищення повітря грубодисперсних домішок не викликає труднощів, на відміну від очищення мікрогетерогенних домішок, яке ускладняється тим, що аеродинамічні властивості таких домішок якісно відрізняються від аеродинамічних властивостей грубодисперсних домішок. Ці властивості визначаються числом Рейнольдса.

Прийmemo, що часточка твердої речовини має сферичну форму. Для сфери відома залежність  $C_x = f(Re)$ , побудована на основі формул Стокса, Озеєна й виведена за результатами проведених експериментальних досліджень (рис. 3). Тут аеродинамічний коефіцієнт  $C_x$  характеризує аеродинамічну силу, яка діє на часточку в потоці рідини або газу.

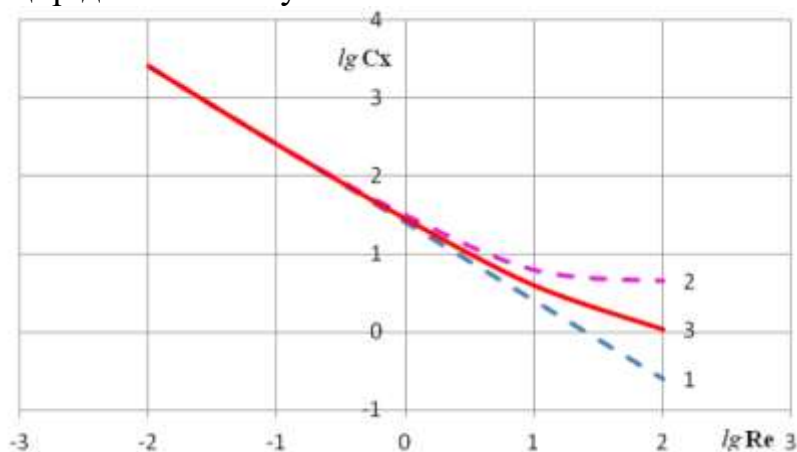


Рисунок 3 – Залежність  $\lg C_x = f(\lg Re)$ :

1 – за Стоксом; 2 – за Озеєном; 3 – за результатами проведених експериментів

Число Рейнольдса визначається за формулою:  $Re = \frac{c \cdot d}{\nu}$ , де  $c$  – характерна швидкість,  $d$  – характерний розмір,  $\nu$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості.

За незмінних характеристик швидкості, наприклад,  $c = 1$  м/с, і при коефіцієнті кінематичної в'язкості для повітря  $\nu = 1,46 \cdot 10^5$  м<sup>2</sup>/с, число Рейнольдса визначається тільки характерним розміром часточок твердої

речовини. Отже, залежність  $C_x = f(Re)$  можна розглядати, як залежність  $C_x = f(d)$ .

За зменшення розміру часточок до певної величини, при якій  $Re \approx 1$ ,  $C_x$  збільшується повільно, і його величина не перевищує декількох одиниць. Подальше зменшення розміру часточок після величини, при якій  $Re \approx 1$ ,  $C_x$  збільшується інтенсивно, і його величина досягає кількох сотень або тисяч одиниць. При цьому сила тяжіння постійно зменшується. Отже, треба очікувати, що існує така величина розміру часточок, за якою аеродинамічна сила перевищує силу тяжіння, що відображено на рис. 4 (тут взято щільність матеріалу часточок  $2200 \text{ кг/м}^3$ ). На рис. 5 показано, що для часточок розміром менше 10 мкм аеродинамічні сили в кілька разів перевищують силу тяжіння; для часточок розміром 1 мкм аеродинамічні сили перевищують силу тяжіння вже в 15 тисяч разів.

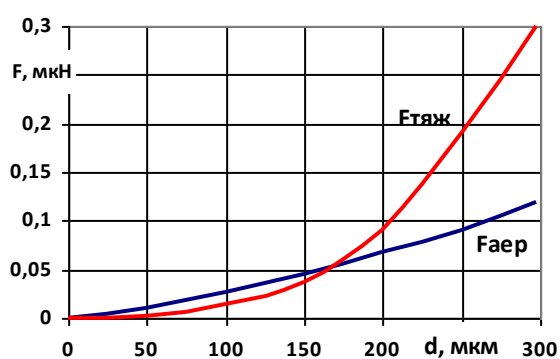


Рисунок 4 – Залежність  $F = f(d)$

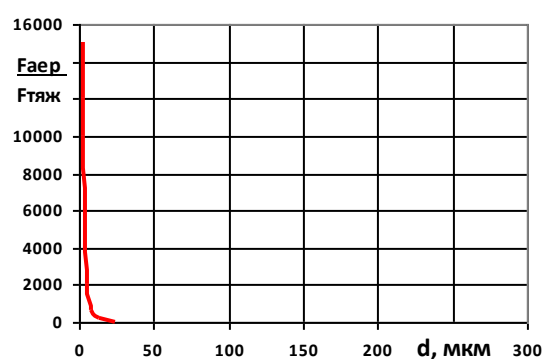


Рисунок 5 – Залежність  $F_{aер} / F_{тяж} = f(d)$

Виходячи з цього, візьмемо до уваги, що порошина – це часточка, для якої аеродинамічна сила за величиною більше сили тяжіння. Грубодисперсні домішки, для яких сила тяжіння перевищує аеродинамічну силу, легко відділяються від потоку повітря, тому їх взаємодію з потоком розглядати не будемо.

Таким чином, ефективний очисник повітря повинен створювати умови, за яких на порошину діє керована сила заданої величини й напрямку, що забезпечує відділення порошини від потоку повітря до її виходу з очисника. Крім того, важливо, щоб ця сила діяла постійно, навіть після завершення процесу відділення порошини від потоку. Це необхідно для надійного її утримання в накопичувачі пилу. Такі умови можуть бути створені в установках типу центрифуги, де на часточки пилу діє відцентрова сила, величину якої можна забезпечити такою, що в десятки тисяч разів перевищує силу тяжіння.

При розрахунках руху в повітряному потоці твердих часток пилу необхідно зробити допущення, що вони не впливають на характеристики потоку. Таке припущення є виправданим для розглянутих умов, коли концентрація пилу є невеликою. Для визначення траєкторій руху твердих часток використовувалася методика, основана на інтегруванні за часом рівнянь руху Ньютона з урахуванням усіх діючих сил (аеродинамічний опір, сила тяжіння, відцентрова й коріолісова сили тощо).

Одним з найпростіших фільтрів із динамічним способом очищення повітря є кільцевий канал, створений двома співвісними трубами різного діаметра. На вході в кільцевий канал установлені лопатки, які жорстко скріплені з обома трубами й обертаються разом з ними навколо осі труб. Це забезпечує закрутку вхідного в очисник потоку, що містить пил. У результаті на пил діє відцентрова сила, що направляє порошини до зовнішньої стінки кільцевого каналу й утримує їх там після торкання. Нами досліджено кілька розрахункових схем динамічних очисників повітря від пилу. Установлено, що на ступінь очищення впливає діаметр кільцевого каналу, частота його обертання, осьова довжина очисника й розміри порошин.

З результатів розрахунків випливає, що запропоноване обладнання має ступінь очищення, характерний для фільтрів бар'єрного типу, причому не становить складнощів подальше поліпшення їх очисних характеристик.

Необхідно відзначити, що найбільш повне очищення екологічно небезпечних домішок викидів вентиляційних систем шахтових комплексів є можливим тільки у разі використання комбінацій декількох типів фільтрів з розрахунком повної системи очищення для кожного окремого комплексу.

Задля безперервної роботи автоматичної системи спостереження за викидами проводився розрахунок кількості працівників, які мають її обслуговувати.

Розглянемо автоматичний апарат для спостереження за викидами, що не потребує втручання працівника за нормальних умов, проте в будь-який час може вийти з ладу, вимагаючи заміну або обслуговування. Час, потрібний на ремонт, розглядають як випадкову величину з певним розподілом. Тобто пристрій спостереження за викидами (ПСВ) можна охарактеризувати постійними величинами  $\eta$  та  $\mu$ , які потрібно визначати таким чином. Під час роботи ПСВ у момент часу  $t$  існує ймовірність потреби ПСВ в обслуговуванні раніше моменту  $t+h$ , яка дорівнює  $\eta h$  плюс змінні, якими можна нехтувати в межах при  $h \rightarrow 0$ . І навпаки, при обслуговуванні ПСВ у момент часу  $t$  існує ймовірність завершення обслуговування раніше, за час  $t+h$ , а тому ПСВ почне роботу в час  $\mu h + 0(h)$ . Для надійного ПСВ  $\eta$  наблизатиметься до нуля, а  $\mu$  буде відносно великим числом. Співвідношення  $\eta/\mu$  – коефіцієнт обслуговування.

Припустимо, що є  $m$  ПСВ з однаковими параметрами  $\eta$  та  $\mu$ , що обслуговуються одним працівником. Якщо ПСВ вийшов з ладу, він обслуговується негайно, якщо тільки працівник не ремонтує в цей час інший ПСВ. У цьому випадку утворюється черга. Мова буде йти про те, що система знаходиться у стані  $E_n$ , якщо не працюють  $n$  ПСВ. При  $1 \leq n \leq m$  це буде означати, що один ПСВ обслуговується, а  $n-1$  стоять у черзі; у стані  $E_0$  всі ПСВ працюють, і працівник, який здійснює обслуговування, відпочиває. Всі  $m$  ПСВ припускаються такими, що працюють незалежно один від одного.

Перехід  $E_n \rightarrow E_{n+1}$  виникає за наявності виходів з ладу одного з  $m - n$  ПСВ, які працюють, тоді як перехід  $E_n \rightarrow E_{n-1}$  здійснюється, якщо один з ПСВ, що розладнався, повернувся за робочого стану. Отже, ми маємо типовий процес розмноження і загибелі з коефіцієнтами (16)

$$\begin{aligned}
 \eta_0 &= m\eta, \\
 \eta_n &= (m-n)\eta, \\
 \mu_0 &= 0, \\
 \mu_n &= \mu, \quad (0 < n < m)
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

Розв'язавши задачу з даними умовами, ми отримаємо необхідну кількість персоналу, який має обслуговувати ПСВ для безперервної роботи системи в цілому.

Враховуючи можливі певні труднощі діагностики контурів системи спостереження за викидами (надалі – системи), а також те, що усунення відмови повинно виконуватись у найкоротший термін, також запропоновано математичне обґрунтування оптимальних дій для ліквідації відмов в системі.

Ліквідація відмов одиничних елементів системи на об'єктах з підвищеним рівнем небезпеки виконується в так званій «блоковий» спосіб. Елемент, який вийшов з ладу, не ремонтують, а підключають замість нього інший – працездатний. Але, навіть за такого спрощення, процедура стає досить важкою за наявності великої кількості дублюючих елементів з різним ступенем досяжності та різною ймовірністю відмови.

Таким чином, у разі виявлення відмови вузла системи, який включає  $n$  елементів, виникає задача про виявлення саме того елемента, який призвів до відмови, з мінімальними витратами часу. До системи можуть входити елементи різних типів: відкритого розміщення, з ускладненою досяжністю та важкодосяжні.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно для кожного  $i$ -го елемента вузла системи ( $I = 1, 2, 3, \dots, n$ ) знати величини наступних двох основних параметрів; витрати часу  $t_i$  на його заміну та ймовірність  $P_i$  його відмови.

Величини зазначених двох параметрів залежать від цілого ряду факторів: від конструкції елемента, ступеня його зносу, матеріалів та ін.

Вибір елемента, з якого необхідно починати обстеження, визначається зіставленням відношень  $t_i / t_j$  з  $P_i / P_j$  ( $I, j = 1, 2, 3, \dots, n$ ). Однак, як буде показано нижче, такий спрощений підхід припустимий тільки для випадку, коли всі  $P_i \ll 1$ .

Методику вибору елемента, який доцільно обстежувати першим, було продемонстровано на прикладі з двома елементами.

Виникнення відмови елемента вузла системи назовемо подією  $A$  (17). З простих міркувань випливає, що подія  $A$  є сумою трьох подій:

$$A = C_1 + C_2 + C_3. \tag{17}$$

Події  $C_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ), які входять у рівняння (18), можна записати у вигляді:

$$C_1 = B_1 \bar{B}_2 \tag{18}$$

– відмова першого елемента (подія  $B_1$ ) і відсутність відмови другого елемента (подія  $\bar{B}_2$ ) (19);

$$C_2 = \bar{B}_1 B_2 \tag{19}$$



– відсутність відмови першого елемента (подія  $\bar{B}_1$ ) і наявність відмови другого елемента (подія  $B_2$ ) (20);

$$C_3 = B_1 B_2 \quad (20)$$

– наявність відмови обох елементів.

Відповідно до теореми множення ймовірностей  $P(AC_k)$  (21) добуток будь-яких двох подій  $A$  і  $C_k$  маємо:

$$P(AC_k) = P(A) P(C_k/A) = P(C_k) P(A/C_k), \quad (21)$$

де  $P(A)$  – ймовірність події  $A$ , а  $P(C_k/A)$  – ймовірність події  $C_k$  за умови, що подія  $A$  відбулася. Зі співвідношення (22) випливає, що шукані ймовірності:

$$P(C_k/A) = \frac{P(C_k)P(A/C_k)}{P(A)}. \quad (22)$$

Відповідно до рівняння (23)

$$P(AC_k) = 1. \quad (23)$$

З огляду на те, що наявність відмови одного елемента не залежить від стану другого елемента, зі співвідношення (24) одержимо:

$$P(A) = P_1(1 - P_2) + (1 - P_1) P_2 + P_1 P_2, \quad (24)$$

де  $P_i = P(B_i)$  – відома ймовірність відмови  $i$ -го елемента.

Підставляючи (22) у (23), з огляду на (24) та визначення ймовірності добутку двох незалежних подій, одержимо три вирази (25, 26, 27), необхідні для розв'язання поставленої задачі:

1. Ймовірність того, що виявлена відмова системи сталася у зв'язку з нештатною ситуацією у першому елементному блоці:

$$P(C_1/A) = \frac{P_1(1 - P_2)}{P_1 + P_2 - P_1 P_2}. \quad (25)$$

2. Ймовірність того, що виявлена відмова системи зумовлена нештатною ситуацією у другому елементному блоці:

$$P(C_2/A) = \frac{P_2(1 - P_1)}{P_1 + P_2 - P_1 P_2}. \quad (26)$$

3. Ймовірність того, що виявлена відмова системи відбулася в зв'язку з відмовою в обох елементних блоках:

$$P(C_3/A) = \frac{P_1 P_2}{P_1 + P_2 - P_1 P_2}. \quad (27)$$

Оптимальна черговість обстеження елементів визначається зіставленням відношення:

$$\frac{P(C_1/A)}{P(C_2/A)} = \frac{P_1(1 - P_2)}{P_2(1 - P_1)} \quad (28)$$

із відношенням  $t_1/t_2$ . При:

$$\frac{P_1(1 - P_2)}{P_2(1 - P_1)} > \frac{t_1}{t_2} \quad (29)$$

впливає, що, у першу чергу, необхідно обстежувати перший блок. При:

$$\frac{P_1(1 - P_2)}{P_2(1 - P_1)} < \frac{t_1}{t_2} \quad (30)$$

обстеження доцільно починати з другого блоку.

Якщо під час обстеження системи буде виявлено відмову елемента, то ймовірність того, що одночасно зазнає нештатної ситуації й інший елемент, подано виразом (27). Виходячи з отриманого за формулою (27) чисельного значення та аналізу існуючого стану, слід прийняти одне з двох рішень:

1. Після усунення відмови одного елемента стежити за подальшим розвитком подій.

2. Слід розпочати обстеження інших елементів.

Використовуючи поданий вище розрахунок, можна обслуговувати систему оптимально за критерієм витрат часу.

Впровадження вищенаведеної методики дозволяє провести розрахунки кількості працівників, які мають обслуговувати автоматичну систему спостереження за викидами для її безперервної роботи, та під час обслуговування вибрати з ряду потенційно можливих відмов пріоритетний напрямок для їх ліквідації.

**П'ятий розділ** присвячено результатам експериментальних досліджень мінімізації вмісту пилу в шахтових викидах в атмосферне повітря.

В умовах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» ВСП «Шахта «Дніпровська» та ДВАТ «Шахта імені М.І. Сташкова» були проведені дослідження вмісту та дисперсного складу шахтового пилу, що перебуває в повітрі на різних ділянках організації шахтових викидів в атмосферне повітря. В таблиці 1 наведені зафіксовані під час експериментів максимальні і мінімальні рівні запиленості атмосферного повітря в різних місцях викиду.

Таблиця 1 – Рівні запиленості атмосферного повітря в місцях шахтного викиду

№ фільтра	Місце викиду	Запиленість повітря, мг/м <sup>3</sup>
220	Клітьовий ствол, верхній посадочний майданчик	12,9
218	Конвеєрний ходок 4 західної розвантажувальної лави пласта	48,7
221	Вентиляційний ходок 4 західної розвантажувальної лави пласта	116,4
211	Нижній посадочний майданчик вентиляційного нахильного квершлага на пласт	32,5

З наведених даних випливає, що вміст пилу в повітрі, яке викидається в атмосферне, є чималим, що потребує створення ефективної системи уловлення пилу задля забезпечення дотримання екологічних норм.

На основі експериментальних даних розподіл часток пилу за розмірами на 13 кругових майданчиках поверхні фільтра № 220 у пробі, відібраній на посадочному майданчику клітьового ствола ВО «Шахта «Холодна Балка» ДП «Макєєввугілля», розраховувались вихідні дані для побудови експериментальної функції розподілу часток пилу за розмірами.

Для розрахунку параметра  $t$  необхідно знати величину медіани  $\delta_{50}$ . Медіана  $\delta_{50}$  ( $AMAD$ ) маси пилу знаходиться в діапазоні 6,48 – 4,32 мкм (середнє значення 5,4 мкм). Розрахунок точного значення медіани  $\delta_{50}$  виконувався виходячи з визначення медіани розподілу маси часток: маса  $m_1$  часток пилу розміром менше  $\delta_{50}$  дорівнює масі  $m_1$  часток пилу розміром більше  $\delta_{50}$ . Маса

пилу  $m$  дорівнює площі фігури, обмеженої зверху функцією  $\varphi(\delta)$ , знизу – віссю абсцис, справа і зліва – ординатами  $\delta_{\min}$ ,  $\delta_{\max}$ .

$$m_1 = \int_{\delta_{\max}}^{\delta_{50}} \varphi(\delta) d\delta, m_2 = \int_{\delta_{\min}}^{\delta_{50}} \varphi(\delta) d\delta. \quad (31)$$

На наступному етапі наших досліджень було проведено розрахунок параметрів  $t$ ,  $F(t)$ ,  $\sigma$ ,  $\delta_{50}$ ,  $\Delta i$ ,  $\bar{\delta}$  для побудови експериментальної функції розподілу часток пилу за розмірами, для умов нижнього посадочного майданчика вентиляційного нахиленого квершлага на пласт ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» ВСП «Шахта «Дніпровська» та ДВАТ «Шахта імені М.І. Сташкова». Гістограми розподілу за розмірами часток пилу, які досліджувалися, відображені на рисунку 6.

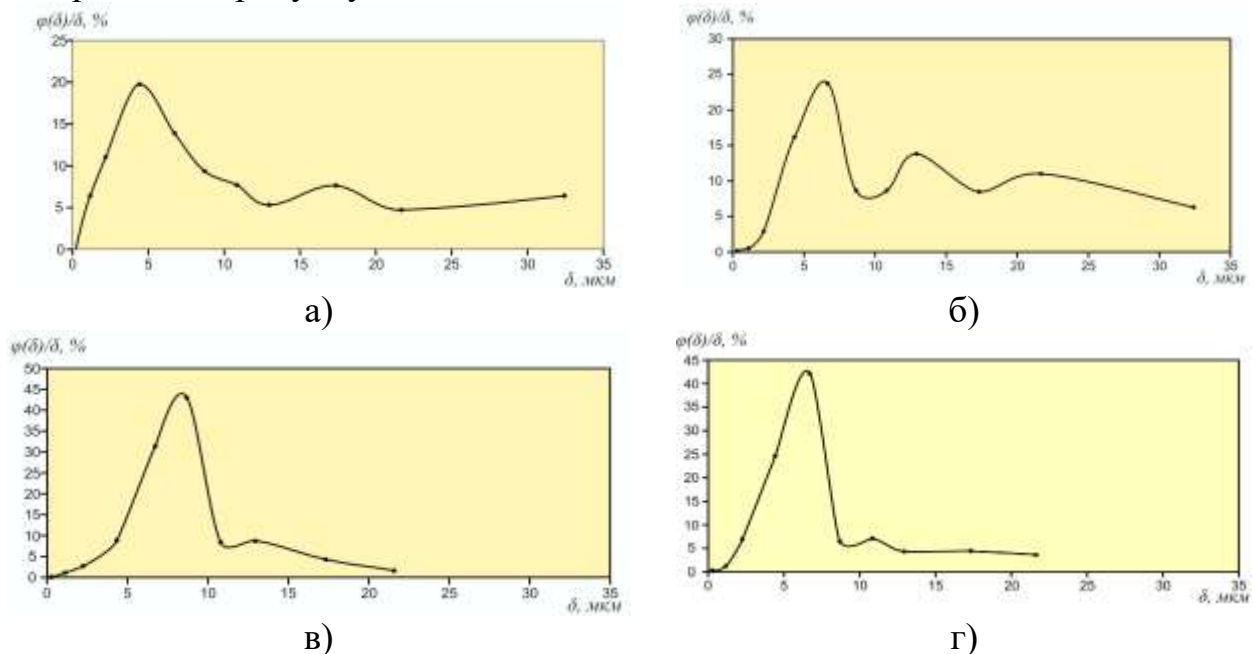


Рисунок 6 – Гістограми розподілу за розмірами часток пилу в шахтових викидах ПрАТ «ДТЕК Павлоградвугілля» ВСП «Шахта «Дніпровська» та ДВАТ «Шахта імені М.І. Сташкова»: а) район нижнього посадочного майданчика вентиляційного нахиленого квершлага на пласт; б) посадочний майданчик клітьового ствола; в) район конвеєрного ходка 4 західної розвантажувальної лави пласта; г) вентиляційного ходка 4 західної розвантажувальної лави пласта

Наведені результати досліджень дисперсного складу пилу в шахтових викидах свідчать, що основна маса його у викидах має розмір часток в діапазоні 1-10 мкм, що становить суттєву загрозу екологічній безпеці прилеглих районів, що підтверджують дослідження концентрації пилу на границі санітарно-захисної зони шахт, де спостерігається перевищення гранично допустимої концентрації пилу в 1,2-2,0 рази.

Таким чином, задля забезпечення зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря шляхом фільтрації шахтових викидів необхідно забезпечити уловлювання дрібнодисперсних фракцій пилу (1-10 мкм) в шахтових викидах.

Названі умови можна створити в динамічному пристрої, який являє собою кільцевий канал, створений двома співвісними трубами різного діаметра. На вході у кільцевий канал встановлені лопатки, які жорстко скріплені з обома трубами і обертаються разом з ними навколо осі труб. У результаті закрутки напил діє відцентрова сила, яка спрямовує частки пилу до зовнішньої стінки кільцевого каналу та утримує їх там після торкання.

Для аеродинамічного розрахунку такого пристрою використовувався програмний комплекс Flow ER, оснований на чисельному інтегруванні осереднених за Фавром рівнянь Нав'є-Стокса, для замкнення яких було застосовано двопараметричну модель турбулентності переносу здвигових напружень.

Було досліджено декілька розрахункових схем динамічних очищувачів повітря від пилу. Встановлено, що на ступінь очищення впливає діаметр кільцевого каналу, частота його обертання, осьова довжина очищувача і розмір частки пилу. Результати розрахунків руху часток пилу в різних очищувачах показані на рисунках 7 і 8. На рисунках представлено проекції векторів швидкості у площі перерізів міжлопаткового каналу і траєкторії руху твердих часток у меридіанному перерізі очищувача, у залежності від початкового положення на вході у канал. З наведених результатів видно, що траєкторія польоту часток залежить від їх початкового положення.

Потужність, що витрачається з урахуванням механічного ККД і запасу потужності для обох очищувачів, становить близько 1,0–1,5 кВт. Фільтри, що розглядалися, мають наступні характеристики.

Фільтр № 1:

- радіуси медіанних обводів – 0,07/0,09/0,11 м;
- частота обертання – 6685 об/хв.;
- перепад статичного тиску – 102–97 кПа;
- витрати повітря – 0,995 кг/с;
- кількість лопаток – 18 шт.;
- ступінь очищення повітря – 30% розмір часток – 1 мкм; 50 % часток мають розмір 2 мкм; 100 % часток мають розмір 3 мкм.

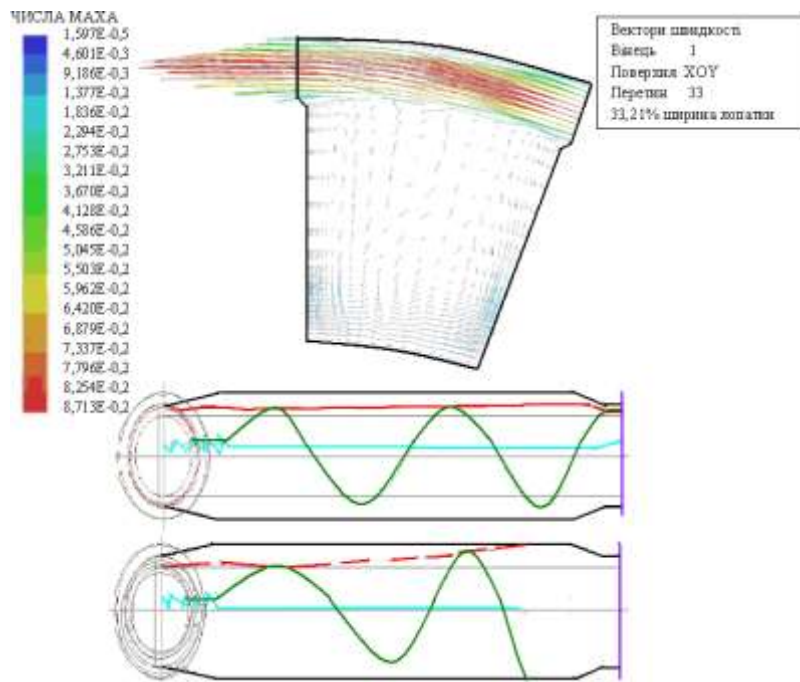


Рисунок 7 – Фільтр № 1

Фільтр № 2:

- радіуси медіанних обводів – 0,08/0,09/0,11 м;
- частота обертання – 8595 об/хв.;
- перепад статичного тиску – 102–97 кПа;
- витрати повітря – 0,45 кг/с;
- кількість лопаток – 24 шт.;
- ступінь очищення повітря – 80 % розмір часток – 1 мкм; 100 % часток мають розмір 2 мкм; 100 % часток мають розмір 3 мкм.

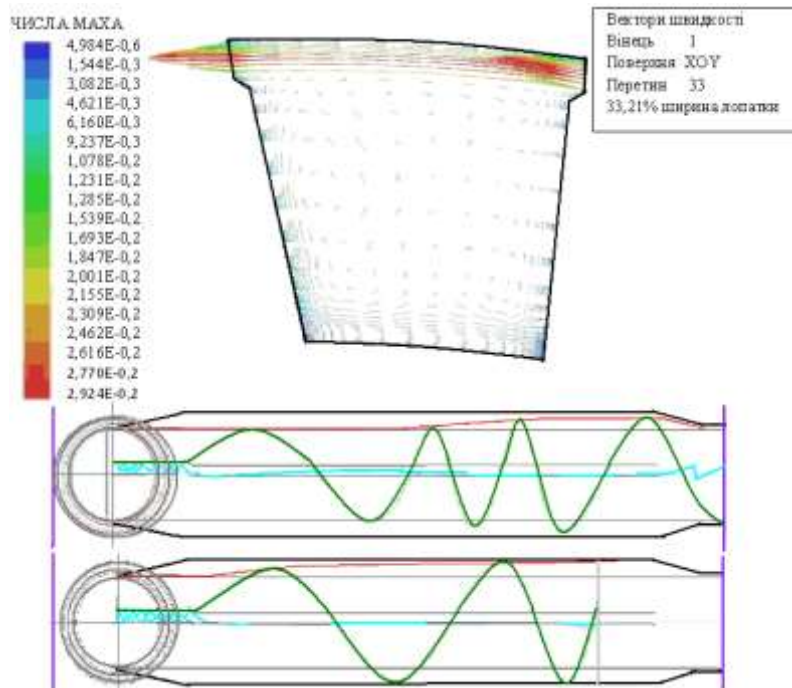


Рисунок 8 – Фільтр № 2

З результатів розрахунків видно, що запропоновані пристрої мають високий ступінь очищення для дрібнодисперсного пилу і можуть використовуватися в якості другого ступеня очищення шахтових викидів в атмосферне повітря, що суттєво забезпечить стабілізацію та поліпшення стану навколишнього природного середовища в регіоні.

Використання запропонованих підходів щодо зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря шляхом фільтрації шахтових викидів, дозволить досягти уловлювання дрібнодисперсних фракцій пилу (1–10 мкм) у шахтових викидах, шляхом застосування на другій стадії очищення шахтового повітря динамічного фільтра з ефективністю видалення дрібнодисперсних часток на 95–99%.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне питання техногенного впливу об'єктів гірничопромислової діяльності на атмосферне повітря та розробки заходів щодо підвищення рівня екологічної безпеки в районах їх розташування.

1. Проведено аналіз стану екологічної безпеки атмосферного повітря в районах проведення гірничих робіт, в результаті якого встановлено, що пилоподібні викиди, які потрапляють до нього, мають найбільшу ймовірність поширення та безпосередньо розподіляються за ознаками їх агрегатного стану, походження та місця утворення.

2. Проаналізовано методи розрахунку концентрації домішок від точкових джерел викидів за різних умов експлуатації шахт. Визначено кількісні межі режимів еволюції пилу в полі тяжіння; отримано рівняння, які дають опис еволюції частинок пилу довільних розмірів.

3. Доведено, що фільтрацію забрудненого пилом шахтного повітря при викидах його в атмосферне, необхідно проводити у два етапи. На першому проводити очищення від частинок пилу великих розмірів, на другому – від дрібних, тим більше, що саме ці частки являють собою найбільшу небезпеку для дихальних шляхів.

4. Створено інформаційну модель поширення забруднення атмосферного повітря шахтовими викидами із заданими початковими та граничними умовами, які дозволяють прогнозувати розподіл концентрації забруднювача у просторі та часі практично для будь-яких можливих надзвичайних ситуацій.

5. На підставі теоретичних досліджень, експериментально визначено, що основна маса шахтового пилу у викидах має розмір часток у діапазоні 1–10 мкм, що зумовлює перевищення гранично-допустимої концентрації пилу в 1,2–2,0 рази на межі санітарно-захисної зони шахт.

6. Розроблено й експериментально перевірено комбіновану систему фільтраційного очищення екологічно небезпечних вентиляційних шахтових викидів, яка забезпечує ефективне уловлювання не тільки крупнодисперсних часток пилу (>10 мкм), а і дрібнодисперсних часток (1–10 мкм) з ефективністю 95–99%.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації*

1. Дармофал Е. А. Екологічна небезпечність шахтових комплексів та її зниження шляхом очищення вентиляційних викидів. *Науковий вісник будівництва* : збірник наукових праць. Харків, 2014. № 3 (77). С. 214-218.

2. Адаменко М. І., Дармофал Е. А. Оцінка екологічного ризику в шахтових регіонах комплексно-інформаційним методом. *Системи обробки інформації* : збірник наукових праць. Харків, 2014. вип. 8(124). С.171-173.

3. Дармофал Е. А., Адаменко Н. И. Техническое обслуживание систем наблюдения за экологически опасным влиянием шахтных выбросов на окружающую среду. *Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии* . 2014. № 1(32). С. 39-42.

4. Адаменко Н. И., Дармофал Е. А. Математична модель поширення атмосфери з шахтових викидів. *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності* : збірник наукових праць. 2014. № 10. С. 163-172.

5. Русанов А. В., Дыхановский В. Н., Дармофал Е. А. Очистка экологически опасных вентиляционных выбросов шахтных комплексов путем создания комбинированных систем фильтрации. *Ежемесячный научный журнал «Молодой ученый»*, 2014. № 19 (78). С. 240-243.

6. Дармофал Е. А. Інформаційне забезпечення екологічної безпеки вентиляційних викидів шахтових комплексів шляхом застосування системи автоматичного сповіщення та багаторівневої фільтрації. *Системи обробки інформації* : збірник наукових праць. Харків, 2015. вип. № 3(128). С. 121-124.

7. Darmofal Eleonora. Vliv na lidske zdravi ekologicky nebezecne exploze duhn s necistoty ve ventilacnich systemach. *Modern science-Moderni veda*. Praha. Ceska republika. Nemoros. 2015. № 3. P. 193-198.

8. Адаменко М. І., Халмурадов Б. Д., Дармофал Е.А. Інформаційна модель поширення забруднення атмосфери на об'єктах гірничо-видобувного виробництва : *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба*. Харків, 2017. вип. № 3(52). с. 126-131.

### *Наукові праці, які свідчать про апробацію матеріалів дисертації*

9. Дармофал Е. А., Доронін Є. В. Інформаційне моделювання мінімізації екологічно небезпечного впливу викидів вентиляції шахтових комплексів. *Методи підвищення ресурсу інженерних інфраструктур* : матеріали VI Всеукраїнського науково семінару. Харків, 2014. С. 32-34.

10. Дармофал Е. А., Адаменко М. І. Системна профілактика силікозу, який виникає у наслідок вентиляційних викидів систем шахтових комплексів. *Інноваційні напрями рекреації, фізичної реабілітації та оздоровчих технологій* : матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2014. С. 30-35.

11. Дармофал Е. А. Моделирование снижения экологической опасности выбросов шахтных комплексов. *Современные направления развития информационно-коммуникационных технологий и средств управления* :

матеріали IV Международной научно-технической конференции. Полтава, Баку, Белгород, Кировоград, Харьков, 2014. С. 67.

12. Дармофал Е.А. Локалізація аварійного впливу на шахтерів небезпечних факторів пилового забруднення шахтових комплексів. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : матеріали п'ятої міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2015. С. 54.

13. Дармофал Е. А. Системы локализации пылевых выбросов. *Наукові розробки, передові технології, інновації* : тези доповідей II Міжнародної науково-практичної конференції. Харків, 2016. С. 27.

14. Халмурадов Б. Д., Дармофал Е. А. Математичне моделювання процесів вентиляції шахтових комплексів. *Проблеми інформатизації* : тези доповідей п'ятої міжнародної науково-технічної конференції. Черкаси, Баку, Бельсько-Бяла, Полтава, 2017. С. 3.

15. Дармофал Е. А. Засоби підвищення екологічної безпеки шахтових викидів шляхом покращення інфільтрації пилогазоподібних відходів. *Інноваційні аерокосмічні технології в екологічному моніторингу* : матеріали науково-технічної конференції. Харків, 2018. С. 30.

16. Адаменко М. І., Дармофал Е. А. Динамічна модель розповсюдження атмосферних забруднень на базі результатів екомоніторингу. *Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління* : тези доповідей десятої міжнародної науково-технічної конференції Баку – Харків – Жиліна, 2020. С. 65.

*Здобувачем удосконалено інформаційну модель поширення забруднення атмосфери з шахтових викидів із заданими початковими та граничними умовами та розроблено комбіновану систему фільтрації очищення екологічно небезпечних вентиляційних шахтових викидів*

## АНОТАЦІЯ

**Дармофал Е.А. Зниження техногенного навантаження на атмосферне повітря шляхом фільтрації шахтових викидів. На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 21.06.01 – екологічна безпека. Сумський державний університет, 2021. Спеціалізована вчена рада Д55.051.04.

Дисертацію присвячено підвищенню рівня екологічної безпеки шляхом створення комбінованих систем фільтрації. Досліджено та впроваджено кілька розрахункових схем динамічних очисників повітря від пилу. Установлено, що на ступінь очищення впливає діаметр кільцевого каналу, частота його обертання, осьова довжина очисника й розміри порошин. З результатів розрахунків випливає, що запропоноване обладнання має ступінь очищення, характерний для фільтрів бар'єрного типу, причому не видається складним подальше поліпшення їх очисних характеристик.

У дисертаційній роботі приведено результати науково-прикладних досліджень із розробки системи вентиляції шахтових комплексів інноваційним способом очистки пилоповітряної суміші, що викидається в атмосферне



повітря, з дотриманням вимог екологічної безпеки. Результати роботи пройшли достатню апробацію та мають впровадження, що підтверджено відповідними актами.

Проаналізовано методи розрахунку концентрації домішок від точкових джерел викидів за різних умов експлуатації. Проте кожен з цих методів має обмежену галузь застосування. Виявлено, що актуальним завданням є створення універсального методу розрахунку, єдиного для різних типів джерел.

Доведено, що фільтрацію забрудненого шахтового пилу при викидах його в атмосферне повітря необхідно проводити у два етапи. На першому слід проводити очищення від частинок пилу великих розмірів, на другому – від дрібних, тим більше, що саме ці частки становлять найбільшу небезпеку для дихальних шляхів.

Запропоновано та обґрунтовано спосіб очищення екологічно небезпечних вентиляційних викидів шахтових комплексів шляхом створення комбінованих систем фільтрації. Розроблено інформаційну модель, вирішено важливу і досить складну наукову задачу щодо створення надійних систем спостереження за викидами та забезпечення їх безаварійної роботи.

На підставі теоретичного й експериментального дослідження підтверджено, що основна маса шахтового пилу у викидах має розмір часток у діапазоні 1–10 мкм, що зумовлює перевищення гранично допустимої концентрації пилу в 1,2–2,0 рази на границі санітарно-захисної зони шахт.

Виходячи з аналізу одержаних даних, стає очевидним, що запропонований спосіб системи фільтрації вентиляційних викидів шахтового повітря є екологічно безпечним та доцільним. Індекс фільтрації вентиляційних викидів шахтового повітря забезпечує ефективне уловлювання дрібнодисперсних часток пилу (1–10 мкм) на 95–99 %.

**Ключові слова:** екологічна безпека, вентиляційні викиди, шахтний пил, система фільтрації, техногенне навантаження, дрібнодисперсні частки.

## АННОТАЦІЯ

**Дармофал Э.А. Снижение техногенной нагрузки на атмосферный воздух путем фильтрации шахтных выбросов.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 21.06.01 – экологическая безопасность. Сумской государственной университет, 2021. Специализированный ученый совет Д55.051.04.

Диссертация посвящена повышению уровня экологической безопасности путем создания комбинированных систем фильтрации. Исследованы и внедрены несколько расчетных схем динамических очистителей воздуха от пыли. Установлено, что на степень очистки влияет диаметр кольцевого канала, частота его вращения, осевая длина очистителя и размеры пылинок. Из результатов расчетов следует, что предлагаемое оборудование имеет степень очистки, характерную для фильтров барьерного типа, причем не представляется сложным дальнейшее улучшение их очистных характеристик.

В диссертационной работе приведены результаты научно-прикладных исследований по разработке системы вентиляции шахтных комплексов инновационным способом, очистке пылевоздушной смеси, выбрасываемой в атмосферный воздух, с соблюдением требований экологической безопасности. Результаты работы прошли достаточную апробацию и имеют внедрения, что подтверждено соответствующими актами.

Проанализированы методы расчета концентрации примесей от точечных источников выбросов при различных условиях эксплуатации. Однако каждый из этих методов имеет ограниченную область применения. Выявлено, что актуальной задачей является создание универсального метода расчета, единого для разных типов источников.

Доказано, что фильтрацию загрязненной шахтной пыли при выбросах его в атмосферу необходимо проводить в два этапа. На первом следует проводить очистку от частиц пыли больших размеров, на втором – от мелких, тем более, что именно эти частицы представляют наибольшую опасность для дыхательных путей.

Предложен и обоснован способ очистки экологически опасных вентиляционных выбросов шахтных комплексов путем создания комбинированных систем фильтрации. Разработана информационная модель, решающая важную и достаточно сложную научную задачу по созданию надежных систем наблюдения за выбросами и обеспечению их безаварийной работы.

На основании теоретического и экспериментального исследования подтверждено, что основная масса шахтового пыли в выбросах имеет размер частиц в диапазоне 1–10 мкм, что приводит к превышению предельно допустимой концентрации пыли в 1,2–2,0 раза на границе санитарно-защитной зоны шахт.

Исходя из анализа полученных данных, становится очевидным, что предложенный способ системы фильтрации вентиляционных выбросов шахтового воздуха является экологически безопасным и целесообразным. Индекс фильтрации вентиляционных выбросов шахтового воздуха обеспечивает эффективное улавливание мелкодисперсных частиц пыли (1–10 мкм) на 95–99%.

**Ключевые слова:** экологическая безопасность, вентиляционные выбросы, шахтная пыль, система фильтрации, техногенная нагрузка, мелкодисперсные частицы.

## ABSTRACT

**Darmofal E.A. Reducing of an anthropogenic load on the atmospheric air by filtering mine emissions. As a manuscript.**

Dissertation for the degree of candidate of technical sciences (doctor of philosophy) in the specialty 21.06.01 – ecological safety. Sumy State University, 2021. Specialized Academic Council D55.051.04.

The dissertation is devoted to increasing of the level of environmental safety by creating combined filtration systems. Several calculation schemes of dynamic air

purifiers from dust have been studied and implemented. It is established that the degree of cleaning is influenced by the diameter of the annular channel, its frequency of rotation, the axial length of the cleaner and the size of the dust. The results of the calculations show that the proposed equipment has a degree of purification characteristic of barrier-type filters, and it does not seem to be difficult to further improvement of their cleaning characteristics.

In the dissertation work are given the results of scientific and applied researches on development of system of ventilation of mine complexes by an innovative way of clearing of the dust and air mixtures, which is thrown out in atmospheric air, with observance of requirements of environmental safety. The results of the work have passed sufficient testing and are implemented, which is confirmed by the relevant acts.

The methods for calculating the concentration of impurities from point sources of emissions under different operating conditions are analyzed. However, each of these methods has a limited scope. Revealed that the urgent task is to create a universal method of calculation, common to different types of sources.

It is proved that the filtration of contaminated mine dust during its emissions into the atmosphere must be carried out in two stages. The first one should be cleaned of large dust particles, the second – of small, especially as these particles are the greatest danger to the respiratory tract.

A method of cleaning environmentally hazardous ventilation emissions of mine complexes by creating combined filtration systems is proposed and substantiated. An information model has been developed, an important and rather complex scientific task has been solved to create reliable emission monitoring systems and ensure their trouble-free operation.

Based on theoretical and experimental research was confirmed that the bulk of mine dust in emissions has a particle size in the range of 1–10  $\mu\text{m}$ , which causes the maximum permissible dust concentration to be exceeded by 1.2–2.0 times at the boundary of the mine protection zone.

Based on the analysis of the obtained data, it becomes obvious that the proposed method of filtration of ventilation emissions of mine air is environmentally friendly and feasible. The index of filtration of ventilation emissions of mine air provides effective capture of fine dust particles (1–10  $\mu\text{m}$ ) by 95–99%.

**Key words:** environmental safety, ventilation emissions, mine dust, filtration system, development pressure, fine particles.

Підписано до друку 21.09.2020.  
Формат 60x90/16. Ум. друк. арк. 2,16. Обл. вид. арк. 2.  
Тираж 100 пр. Зам. № 2115199

Видавець і виготовлювач  
Надруковано у ФЛ-П Черняк Л. О.  
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16  
Свідоцтво № 24800000000079553, від 16.05.2007 р.