

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ



КОЗАЧИНА ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 628.511:519.6:001.891.5

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
ЗАХИСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ЗАХИСТУ РОБОЧИХ ЗОН ВІД
ПИЛОВОГО ТА ТЕРМІЧНОГО ЗАБРУДНЕННЯ**

05.26.01 – охорона праці

Реферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Дніпро – 2026

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Українському державному університеті науки і технологій Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Біляєв Микола Миколайович,
Український державний університет науки і технологій, завідувач кафедри гідравліки, водопостачання та фізики Навчально-наукового інституту «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту».

Опоненти:

доктор технічних наук, професор **Чеберячко Юрій Іванович**, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», професор кафедри охорони праці та цивільної безпеки;

доктор технічних наук, професор **Сукач Сергій Володимирович**, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, завідувач кафедри цивільної безпеки, охорони праці, геодезії та землеустрою;

доктор технічних наук, професор **Бурдейна Наталія Борисівна**, Київський національний університет будівництва і архітектури, професор кафедри фізики.

Захист відбудеться 26 листопада 2026 р. о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.07 з присудження наукового ступеня доктора наук при Українському державному університеті науки і технологій за адресою: 49005, м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а, ауд. 203.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Українського державного університету науки і технологій (м. Дніпро, вул. Архітектора Олега Петрова, 24а) та на сайті: <https://ust.edu.ua/nauka/speczializovani-vcheni-rady/razovi-speczializovani-vcheni-rady-phd/speczializovana-vchena-rada-d-08-084-07/>.

Реферат розісланий «___» жовтня 2026 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Тетяна КРАВЧУНОВСЬКА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Сутність **науково-прикладної проблеми**, що розглядається в роботі, полягає у підвищенні ефективності захисту робочих зон від пилового та теплового навантаження на основі розробки та використання науково обґрунтованих засобів аеродинамічного захисту.

Актуальність теми. Проблема пилового або теплового забруднення повітря робочих зон є вкрай актуальною для різних галузей промисловості, оскільки супутні негативні явища сприяють появі у працівників професійних захворювань. Тому в Україні приділяється значна увага розробці методів зниження пилового та теплового забруднення повітря робочих зон і в цьому напрямку накопичено значний досвід. Але некоректним буде твердження, що ця проблема вже отримала остаточне рішення. Багато питань, що пов'язані з процесами пилоутворення, пилопригнічення тощо, ще потребують свого вирішення. Це пов'язано з багатофакторністю процесів формування областей пилового та теплового забруднення на підприємствах. В рамках цієї проблеми ще не вирішені питання щодо визначення закономірностей формування аеродинаміки потоків на промислових майданчиках, які мають суттєвий вплив на ефективність різних засобів захисту повітря від забруднення на промислових майданчиках. Тому наукові дослідження, що спрямовані на дослідження аеродинаміки потоків на промислових майданчиках, підвищення ефективності захисту робочих зон від забруднення залишається актуальною науково-прикладною проблемою.

Актуальність наукових досліджень у цьому напрямку підтверджується положеннями Конституції України, які гарантують громадянам безпеку праці, та відповідає вимогам Закону України «Про охорону праці» № 2694-ХІІ від 14 жовтня 1992 року, Закону України «Про затвердження Загальнодержавної соціальної програми поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки» № 178-VII від 4 квітня 2013 року.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках наукових робіт Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна «Моделювання процесів забруднення навколишнього середовища при надзвичайних ситуаціях та організованих викидах забруднюючих речовин» (№ держреєстрації 0115U007226, рівень участі – відповідальний виконавець), «Захист навколишнього середовища на об'єктах транспортної інфраструктури» (№ держреєстрації 0115U007227, рівень участі – відповідальний виконавець), а також Українського державного університету науки і технологій (УДУНТ) «Розробка теоретичних методів експрес оцінювання техногенного навантаження на навколишнє середовище» (№ держреєстрації 0123U105332, рівень участі – відповідальний виконавець), «Розробка математичних моделей оцінки ефективності систем захисту робочих зон в умовах техногенного навантаження» (№ держреєстрації 0123U105336, рівень участі – керівник).

Мета і завдання дослідження. Мета дисертаційної роботи полягає в підвищенні ефективності захисту робочих зон від пилового та теплового

навантаження на основі розробки та використання науково обґрунтованих засобів аеродинамічного захисту.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі **завдання**.

- виконати аналіз засобів захисту повітря на промислових майданчиках від пилового забруднення;
- виконати аналіз сучасних методів дослідження процесів тепломасопереносу на промислових майданчиках;
- провести експерименти для аналізу аеродинаміки потоків на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів з перфорацією;
- провести експерименти для аналізу аеродинаміки потоків на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів складної геометричної форми;
- провести експерименти по оцінюванню ефективності «захоплення» краплею води часток вугільного пилу;
- провести експерименти по оцінці інтенсивності пилоутворення від забруднених ділянок промислових майданчиків при різних метеорологічних умовах;
- побудувати емпіричні моделі для інженерного вирішення комплексу задач, що пов'язані з процесами пилоутворення на промислових майданчиках;
- розробити чисельні моделі для оцінки ефективності використання на промислових майданчиках захисних бар'єрів з перфорацією;
- розробити чисельні моделі для оцінки ефективності використання на промислових майданчиках захисних бар'єрів складної геометричної форми;
- розробити чисельну модель для оцінки ефективності використання габіонів для захисту від ураження уламками корпусу нафтосховища;
- розробити чисельну модель для оцінки ефективності використання системи «захисний екран + вторинний вдув» для захисту нафтосховища від теплового навантаження;
- розробити математичну модель для аналізу процесу випаровування води зі змоченої поверхні вугілля після її зрошування;
- створити спеціалізоване програмне забезпечення (коди) для проведення обчислювального експерименту на базі побудованих математичних моделей;
- провести верифікацію побудованих чисельних моделей;
- провести комп'ютерні експерименти по оцінці ефективності використання аеродинамічних засобів захисту повітря від пилового та теплового забруднення на промислових майданчиках.

Об'єкт дослідження: процеси пилового та теплового забруднення на промислових майданчиках.

Предмет дослідження: методи мінімізації рівня пилового та теплового забруднення повітря на промислових майданчиках.

Методи дослідження: фізичний експеримент, використання теорії границь, методів системного аналізу та чисельного моделювання, аналітичне узагальнення сучасних наукових результатів. Математичною основою моделей поширення пилу та тепла є фундаментальні рівняння механіки суцільного

середовища. Чисельне інтегрування рівнянь моделей здійснюється за допомогою кінцево-різницевої схем.

Наукова новизна отриманих результатів:

вперше:

- експериментально встановлено закономірності аеродинаміки потоків при використанні на промислових майданчиках захисних бар'єрів з перфорацією;

- експериментально встановлено закономірності аеродинаміки потоків при використанні на промислових майданчиках захисних бар'єрів складної геометричної форми;

- експериментально і теоретично обґрунтовано застосування на промислових майданчиках захисних бар'єрів складної геометричної форми для захисту повітря від пилового забруднення;

- експериментально визначено кількість пилу, що «захоплює» крапля води при своєму русі в забрудненому середовищі;

- розроблено комплекс CFD моделей для оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів з перфорацією; моделі дозволяють враховувати аеродинаміку потоків на промисловому майданчику, різний ступінь перфорації захисного бар'єру та його розміри, інтенсивність пилоутворення, різні метеорологічні умови;

- розроблено комплекс CFD моделей для оцінювання ефективності використання захисних бар'єрів складної геометричної форми; моделі дозволяють враховувати аеродинаміку потоків на промисловому майданчику, різну форму бар'єрів та їх розміри, інтенсивність пилоутворення, різні метеорологічні умови;

- розроблено математичну модель для експрес оцінювання ефективності використання габіонів для захисту об'єктів від металюї дії уламків, що утворюються при вибухах дронів;

- розроблено чисельну модель для експрес оцінювання ефективності використання системи «захисний бар'єр+вторинний вдув» для захисту від термічного ураження корпусу нафтохранища.

дістали подальший розвиток:

- емпірична модель «захоплення» краплею води часток вугільного пилу, що дозволяє визначити масу пилу та час, за який проходить процес «захоплення» пилових часток;

- емпірична модель оцінювання інтенсивності пилоутворення від забрудненої ділянки, яка дає можливість швидко визначити цей важливий параметр при застосуванні моделей масопереносу пилу на промислових майданчиках;

- математична модель дифракції ударної хвилі на об'єктах, що дає можливість проводити розрахунки в багатозв'язних областях;

- математична модель випаровування води зі змоченої поверхні вугілля, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, враховувати вплив аеродинаміки повітряного потоку над областю випаровування на інтенсивність потрапляння парів в повітря.

Практичне значення отриманих результатів.

– встановлені закономірності аеродинаміки потоків на промислових майданчиках дають можливість науково обґрунтовано визначати місце розташування захисних бар'єрів з перфорацією або бар'єрів, що мають складну геометричну форму;

– розроблені емпіричні моделі дають можливість забезпечити базовою інформацією математичні моделі масопереносу, що використовуються для оцінки рівня пилового забруднення робочих зон;

– розроблені CFD моделі мають широкий робочий діапазон та дають можливість проводити значну кількість наукових досліджень без використання фізичного експерименту;

– розроблені CFD моделі дають можливість оперативно (протягом декількох секунд) визначити ефективність використання захисних бар'єрів на промисловому майданчику для зменшення пилоутворення або теплового забруднення; це дає змогу проєктувальникам за короткий час здійснити значну кількість розрахунків для наукового обґрунтування систем захисту;

– розроблені CFD моделі є сучасним інструментом вирішення складних багатфакторних задач тепломасопереносу в областях складної геометричної форми; вони ефективно можуть бути використані на етапі проєктування «фор-ескіз» при обґрунтуванні систем захисту повітря від пилового та теплового забруднення;

– для імплементації розроблених CFD моделей немає потреби використання потужних комп'ютерів; для практичної реалізації моделей необхідна стандартна інформація без потреби проводити додаткові дослідження, щоб забезпечити моделі вхідною інформацією;

– розроблені моделі використовуються у навчальному процесі Українського державного університету науки і технологій та у виробничій діяльності Дніпровського відділення Філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця».

Особистий внесок здобувача в наукових працях, опублікованих у співавторстві:

– розроблено чисельні моделі масопереносу в областях складної геометричної форми [1, 2, 9, 10, 13, 14, 16, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 48, 49, 50];

– розроблено чисельні моделі аеродинаміки в областях складної геометричної форми [7-9, 11, 12, 16, 17, 20, 23-25, 31-36, 38, 39, 42, 47];

– розроблено чисельні моделі теплопереносу, здійснено розробку чисельних моделей для аналізу впливу вдуву повітря на тепловий режим [4-6, 18, 24, 27-29];

– розроблено чисельні моделі руху уламку та його взаємодії з перешкодами [18, 19, 22, 23, 37];

– розроблено чисельну модель взаємодії ударної хвилі з перешкодами [40];

– розроблено комп'ютерні коди для реалізації чисельних моделей [1, 2-4, 7-9, 10, 11, 13-15, 19-29, 31-41, 44-50];

– проведено обчислювальні експерименти на базі розроблених моделей, виконано аналіз та обробку результатів дослідження [8, 17, 19, 20, 22, 24, 25, 29, 37, 40, 43, 45, 47, 48];

– проведено фізичні експерименти, виконано аналіз та обробку результатів дослідження [17, 49-52].

Апробація матеріалів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на: XII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» (Warsaw, April, 2019); XV International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» (Warsaw, July, 2019); Міжнародному науковому симпозиумі «Тиждень еколога – 2021» (Кам'янське, жовтень 2021 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, листопад 2021 року); 25th International scientific conference TRANSPORT MEANS 2021 (Kaunas, Lithuania, October 2021); Тринадцятій міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM'2022» (Дніпро, травень 2022 р.); 27th International scientific conference TRANSPORT MEANS 2023 (Kaunas, Lithuania, October 2023); VIII Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, листопад, 2023); 28th International scientific conference TRANSPORT MEANS 2024 (Kaunas, Lithuania, October 2024); XVIII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (Дніпро, грудень 2024 р.); International Conference on Urban Infrastructure Sustainable Development and Renovation MISTOBUD-2025 (Kharkiv, January 30-February 01, 2025); 5th International Scientific and Practical Conference «New Horizons in Scientific Research: Challenges and Solutions» (Marseille, November, 2025); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (Дніпро, грудень 2025).

Публікації. Основні положення, результати та висновки дисертації відображено в 52 публікаціях, а саме: 2 монографіях; 1 статті в закордонному науковому періодичному виданні, проіндексованому в міжнародній наукометричній базі даних Scopus; 4 статтях у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії А; 23 статтях у наукових періодичних виданнях, включених до переліку наукових фахових видань України категорії Б; 9 тезах доповідей; 13 працях, які додатково відображають наукові результати.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг дисертації – 345 сторінок, з них основного тексту – 275 сторінок. Робота містить 186 рисунків, 18 таблиць. Список використаних джерел містить 148 найменувань. У додатках наведені документи про впровадження результатів дослідження та список публікацій за темою дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими програмами; сформульовано мету та завдання дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; зазначено особистий внесок автора роботи, наведено відомості про апробацію досліджень та публікації.

В **першому розділі** виконано аналіз характеристик, властивостей різних видів пилового забруднення (PM – particulate matter), описано вплив пилового забруднення на працівників, визначено науковий доробок з проблеми оцінювання ризику на промислових об'єктах. Проведено аналіз літературних джерел в контексті методів боротьби з пиловим забрудненням повітря на промислових майданчиках, який показав, що найбільш поширено використовуються захисні бар'єри для зменшення рівня пилового забруднення на промислових майданчиках, а саме перфоровані захисні бар'єри або бар'єри складної геометричної форми; наукове обґрунтування використання таких захисних бар'єрів потребує наявності у проєктувальників спеціальних методів розрахунку.

У **другому розділі** здійснено системний аналіз методів наукового дослідження, що використовуються при рішенні задач аеродинаміки, тепломасопереносу в галузі забруднення робочих зон на об'єктах гірничо-промислового комплексу, серед яких були виділені:

- фізичний експеримент, який дає можливість визначати закономірності формування областей забруднення від різних джерел емісії пилу та небезпечних речовин, але для його проведення потрібен значний час та кошти, що ускладнює проведення комплексних наукових досліджень;

- емпіричні моделі, що дають, з одного боку, важливі закономірності фізичного процесу, що досліджується, а з іншого боку, можуть бути інкорпоровані в «тіло» складних багатофакторних чисельних моделей, що дають можливість дослідити процес при варіації різноманітних параметрів;

- математичне моделювання, що є найбільш поширеним інструментом вивчення різноманітних процесів пилового, теплового забруднення робочих зон, дослідження нестационарних процесів теплопереносу, руху повітря на промислових майданчиках;

- CFD моделювання, що є особливо важливим інструментом наукових досліджень в теперішній час, дає можливість аналізувати поля течії, концентраційні поля пилу в робочих зонах з детальною дискретизацією області дослідження.

CFD моделювання є найбільш потужним інструментом в наукових дослідженнях на сьогодні. Аналіз літературних джерел виявив, що зараз в Україні існує певний дефіцит швидкорозрахункових CFD моделей. Наявність таких математичних моделей прискорює отримання результатів при проведенні проєктних робіт та зменшує їх вартість.

Розглянуто моделі оцінки ризику захворювання працівників. Широкого використання набула методика US EPA (США) з відповідним програмним забезпеченням для розрахунку ризиків. Ця програма реалізує алгоритм визначення ризиків з урахуванням робочого часу працівника, кількості робочих

днів, кількість років роботи. Також враховуються антропометричні дані працівника (маса, інтенсивність вдихання повітря). За цією методикою реферативна доза RfD , тобто концентрація пилу, за якої не виникатиме загрози для здоров'я працівника, визначається за формулою:

$$RfD = \frac{RfC \cdot IR}{BW}, \quad (1)$$

де IR – витрата повітря при диханні ($\text{м}^3/\text{добу}$); RfC – реферативна концентрація (для $\text{PM}_{2.5}=5 \text{ мг}/\text{м}^3$); BW – вага тіла.

Для експрес оцінювання ризику для працівників використовується відносний ризик RR :

$$RR = e^{\beta(C-C_0)}, \quad (2)$$

де $\beta=0,038 \%$; C – концентрація пилу в робочій зоні; $C_0=5 \text{ мг}/\text{м}^3$ для $\text{PM}_{2.5}$.

Для експрес оцінки ефективності бар'єру використовувався також параметр HQ (інтегрований в розроблену чисельну модель):

$$HQ = \frac{C_R}{RfC}, \quad (3)$$

де HQ – показник ризику потенційної небезпеки (Hazard Quotient); C_R – концентрація в точці розташування рецептора; RfC – референтна концентрація (приймається $RfC = 5 \text{ мг}/\text{м}^3$). Якщо $HQ \ll 1$, це означає, що ризик для здоров'я мінімальний.

В **третьому розділі** розглядаються результати експериментальних досліджень по визначенню закономірностей пилоутворення від ділянок, що забруднені вугільним пилом.

Дослідження закономірностей пилоутворення та визначення значення порогової швидкості, при якій відбувається відокремлення частинок від поверхні вугілля (suspension) та їх перенесення потоком повітря, проводилися в лабораторії кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» УДУНТ (рис. 1).

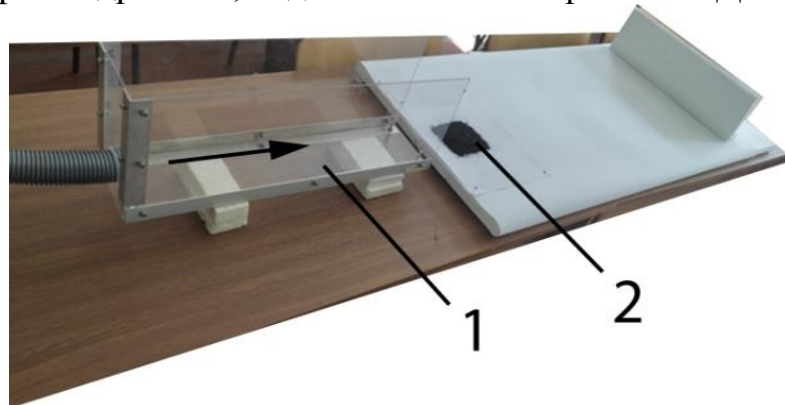


Рисунок 1 – Дослідна установка:

1 – повітряний короб від повітродувки; 2 – вугілля.

Встановлено, що при розробці заходів по зменшенню процесу пилоутворення на промисловому майданчику (наприклад, при використанні захисних екранів) потрібно забезпечити швидкість повітряного потоку на промисловому майданчику не більше величини: $v_s=4,1 \div 4,5 \text{ м}/\text{с}$.

Обробка даних експериментів дає наступну емпіричну залежність для визначення інтенсивності пилоутворення при різній швидкості повітряного потоку:

$$Q = 5 \cdot 10^{-8} \cdot V^{3.0149} \frac{e}{c \cdot \text{см}^2}, \quad (4)$$

де Q – інтенсивність виносу вугільного пилу; V – швидкість повітряного потоку, м/с.

Емпіричну модель (4) можна використовувати при проведенні досліджень методом чисельного моделювання для прогнозування рівня запиленості у робочих зонах на промислових майданчиках.

Далі проведено вимірювання концентрація пилу $\text{PM}_{2.5}$ на висоті 10 см (це відповідає характерному масштабу моделі $L=10$ см), при різній відстані від площинного джерела пилового забруднення та різній швидкості набігаючого повітряного потоку. Результати вимірювань представлено на рис. 2.

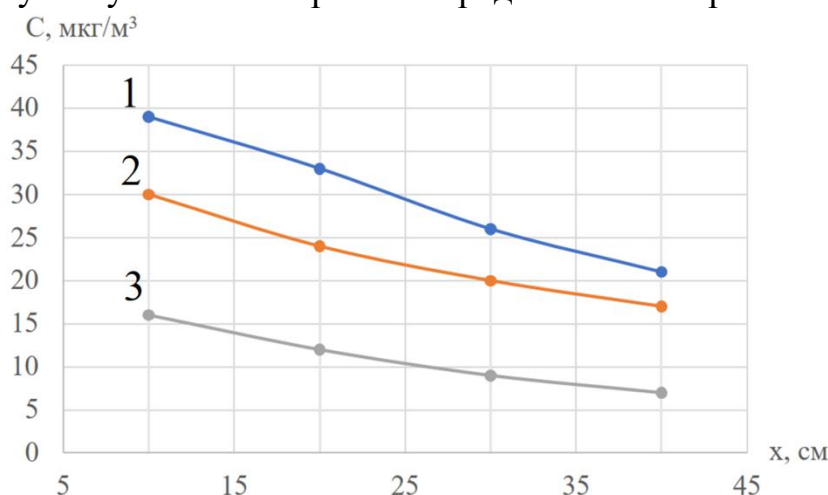


Рисунок 2 – Концентрація пилу ($\text{PM}_{2.5}$) на різній відстані від області пилоутворення:

1 – $V=8,2$ м/с; 2 – $V=7,7$ м/с; 3 – $V=4,5$ м/с.

Як можна бачити з рис. 2, концентрація пилу зменшується практично в 2 рази на відстані $4L$ від джерела забруднення.

Зволоження поверхні вугільного штабелю широко використовується в світі для зменшення пилоутворення. Але під дією вітрового потоку, температури навколишнього середовища має місце випаровування вологи з поверхні вугілля. Тому важливо визначати час, коли вологість вугілля зменшиться до критичного значення та потрібно буде знову організувати подачу води на штабель.

Встановлено, що при використанні в якості боротьби з пилоутворенням змочування водою поверхні вугілля, слід контролювати вологість цієї поверхні і у випадку, коли вологість поверхні вугілля буде порядку 2-3 %, слід повторити змочування вугілля.

Отримано емпіричну модель (5), за допомогою якої можна визначати час, коли вологість вугілля зменшиться та досягне межі 3 %, при якій починається процес пилоутворення, тому слід повторити змочування поверхні вугілля:

$$P = 9 \cdot e^{-0.1t} \quad (5)$$

де P – вологість, t – час.

Особливо важливим аспектом є визначення ефективності подачі води в пилову хмару з метою зменшення концентрації пилу в повітрі робочої зони. В розділі наведено результати проведених експериментальних досліджень (рис. 3) по визначенню кількості вугільного пилу, що «захоплює» крапля води при русі в області пилового забруднення.

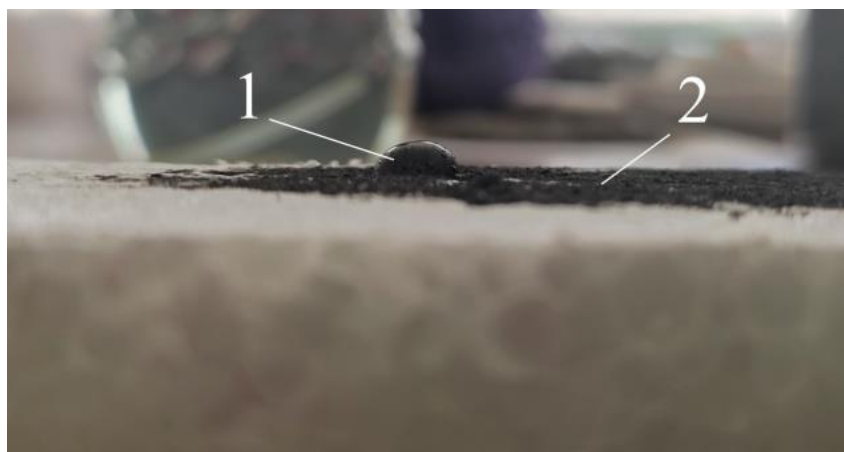


Рисунок 3 – «Крапля води + вугільний пил» на її поверхні пластині:
1 – крапля; 2 – поверхня з вугільним пилом.

Згідно з результатами експериментальних досліджень можна вважати, що крапля води захоплює кількість пилу, що відповідає приблизно 18 % від маси краплі.

Представлено побудову чисельної моделі, що використовується для аналізу ефективності подачі води в пилову хмару (рис. 4) для зменшення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику.

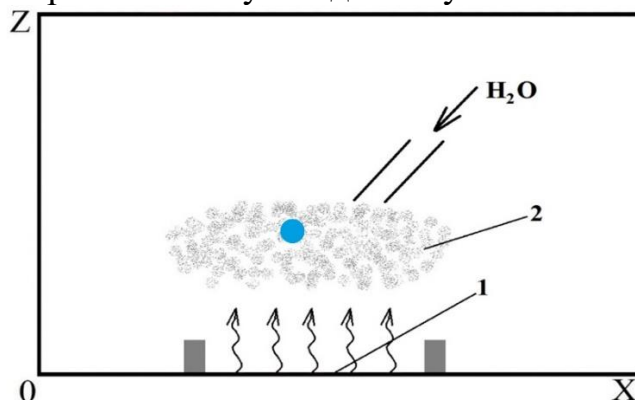


Рисунок 4 – Розрахункова схема:
1 – область пилоутворення; 2 – область розпилювання води.

Процес руху часток пилу в повітрі над промисловим майданчиком описується рівняння масопереносу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (6)$$

де C – масова концентрація пилу в повітрі; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії; u, v, w – компоненти швидкості потоку повітря; Q – інтенсивність емісії пилу в атмосферу; $\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i, z_i – координати точкового джерела емісії домішки; t – час.

Для моделювання процесу розсіювання крапель води в повітрі використовується аналогічне тривимірне рівняння масопереносу:

$$\begin{aligned} \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} + \frac{\partial wS}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial S}{\partial z} \right) + Q_w(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (7)$$

де S – концентрація крапель води в повітрі, w_s – швидкість гравітаційного осадження крапель води (відома величина, в рівнянні прийнято $w=w-w_s$).

На рис. 5 представлена концентрація пилу для сценарію № 1 (відсутнє зрошування) та на рис. 6 – для сценарію № 2 (є розпилювання води).

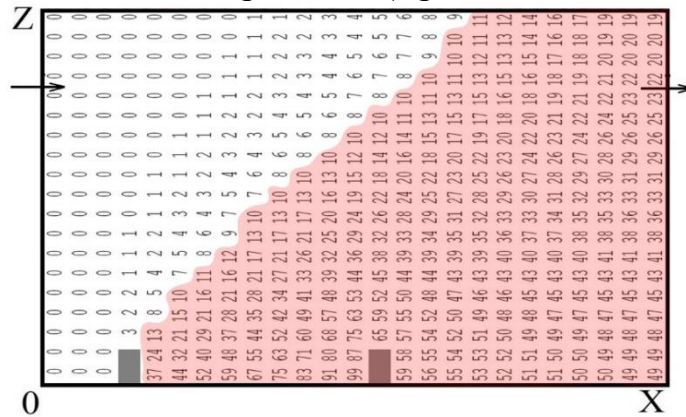


Рисунок 5 – Область пилового забруднення повітря (відсутнє розпилювання води).

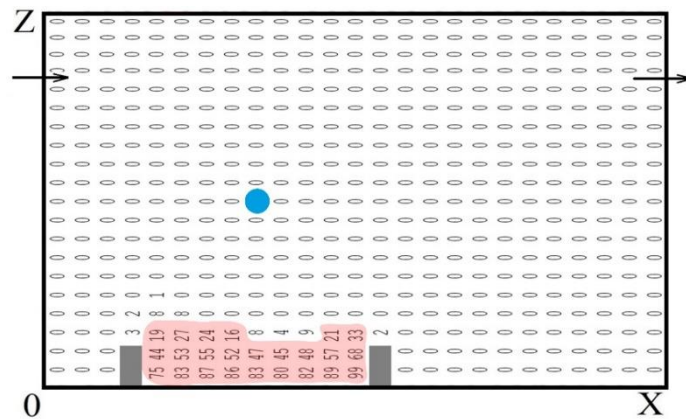


Рисунок 6 – Область пилового забруднення повітря (є розпилювання води).

Як можна бачити з наведених рисунків, зрошування води дає можливість значно зменшити рівень пилового забруднення повітря на промисловому майданчику: область пилового забруднення практично «локалізована» та формується лише над зоною пилоутворення.

В **четвертому розділі** представлено результати експериментальних досліджень, присвячених інтенсивності утворення пилу на промисловому майданчику за умов застосування різних типів захисних бар'єрів.

1. Повністю перфорований бар'єр (рис. 7).

Розглядалися наступні сценарії:

- 1) пористість бар'єру 20 %;
- 2) пористість бар'єру 30 %;
- 3) пористість бар'єру 38 %.



Рисунок 7 – Модель захисного бар'єру (пористість бар'єру 30%).

Експеримент проводився у три етапи з варіацією швидкості повітряного потоку.

Етап 1: вимірювання швидкості повітря безпосередньо за захисним бар'єром (на висоті $0,1H$ та відстані $0,5H$ від бар'єру, H – висота бар'єра) (рис. 8-10).

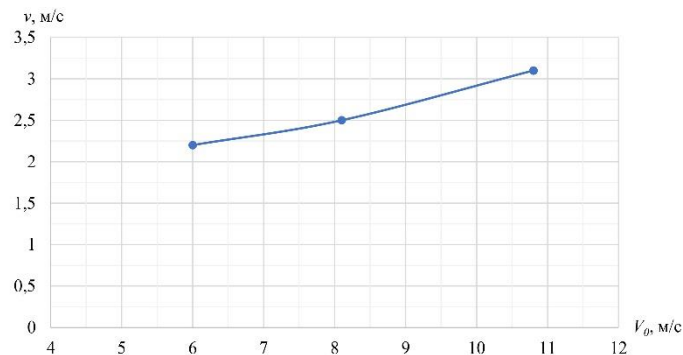


Рисунок 8 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (пористість 20 %): $v = 1,4179 \cdot e^{0,0718 \cdot V_0}$.

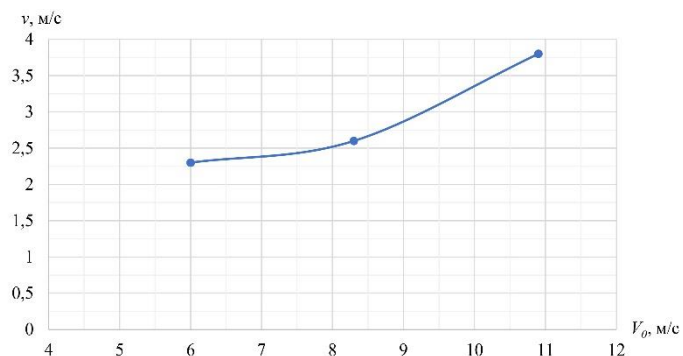


Рисунок 9 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (пористість 30 %): $v = 1,1883 \cdot e^{0,1034 \cdot V_0}$.

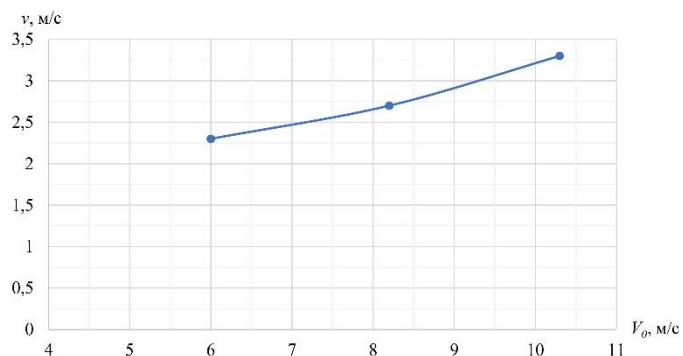


Рисунок 10 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (пористість 38 %): $v = 1,3796 \cdot e^{0,0839 \cdot V_0}$.

Етап 2: вимірювання швидкості повітря на різній відстані від захисного бар'єру (на висоті 0,1Н) (рис. 11-13).

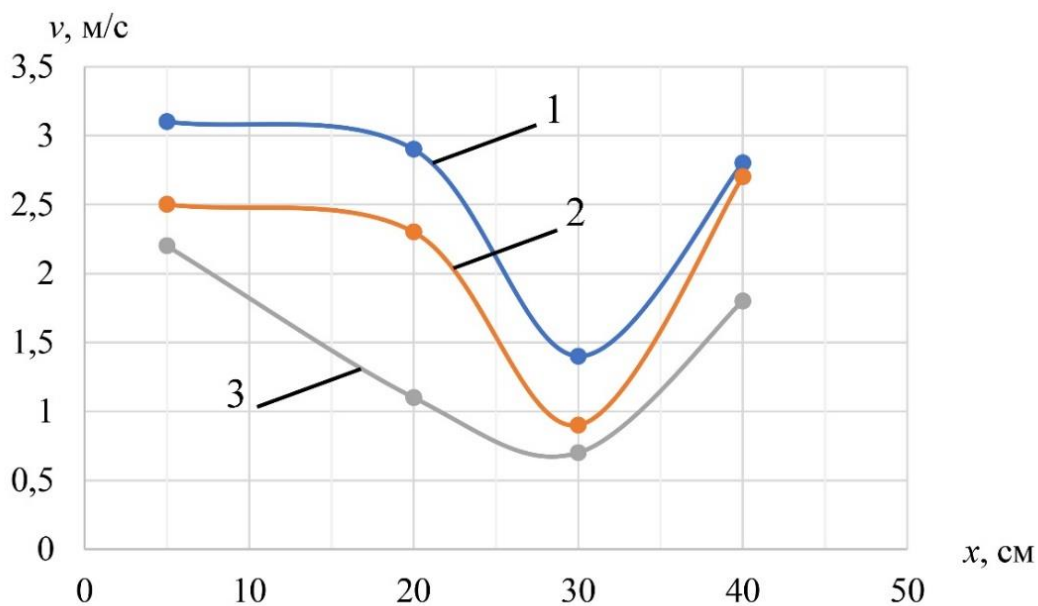


Рисунок 11 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (пористість 20 %): 1 – $V_0 = 10,8$ м/с; 2 – $V_0 = 8,1$ м/с; 3 – $V_0 = 6$ м/с.

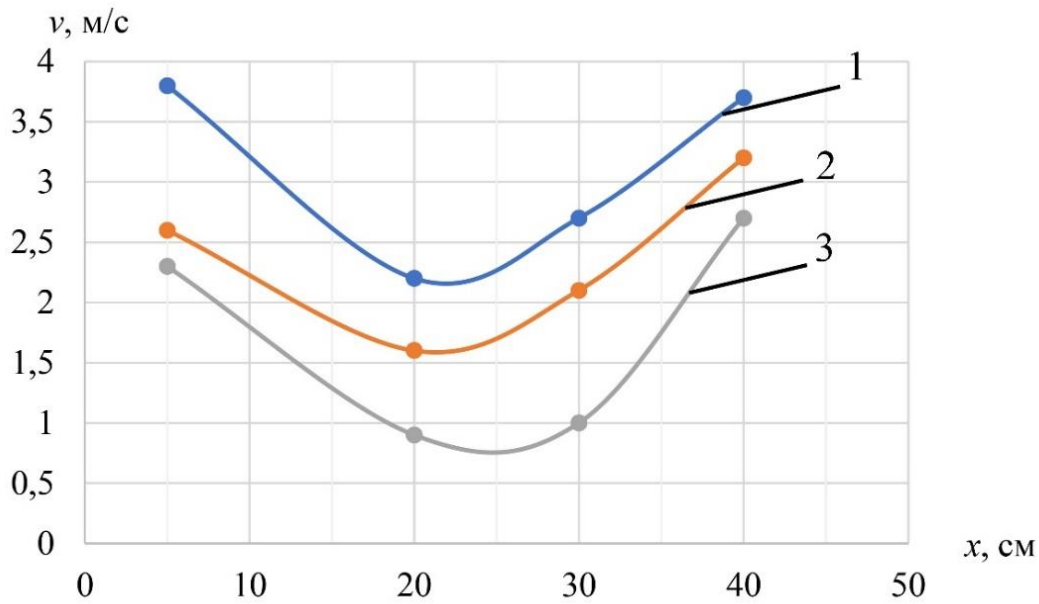


Рисунок 12 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (пористість 30 %): 1 – $V_0=10,9$ м/с; 2 – $V_0=8,3$ м/с; 3 – $V_0=6$ м/с.

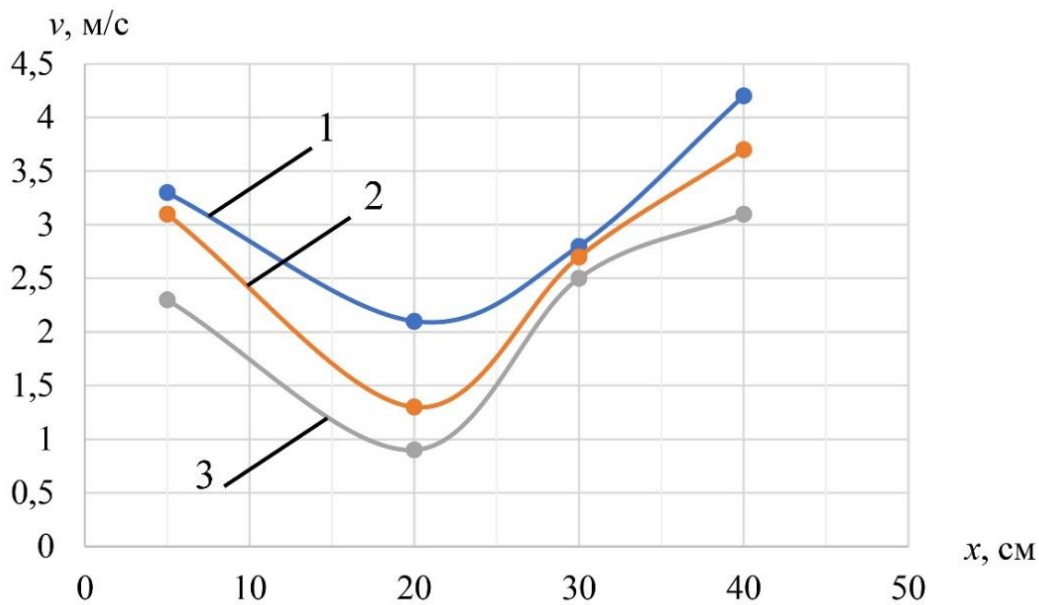


Рисунок 13 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (пористість 38 %): 1 – $V_0=10,3$ м/с; 2 – $V_0=8,2$ м/с; 3 – $V_0=6$ м/с.

Результати, наведені на рис. 11-13, дають можливість визначити таку закономірність: при збільшенні пористості проникного бар'єру точка, де має місце мінімальна швидкість потоку на майданчику, «зсувається» в бік бар'єру, а саме:

- 1) при пористості бар'єру 20 % мінімальна швидкість повітряного потоку фіксується на відстані 3Н від бар'єру;
- 2) при пористості бар'єру 30 % мінімальна швидкість повітряного потоку фіксується на відстані 2,5Н від бар'єру;

3) при пористості бар'єру 38 % мінімальна швидкість повітряного потоку фіксується на відстані $2H$ від бар'єру.

Етап 3: визначення інтенсивності пилоутворення при використанні захисного бар'єру цього типу.

Було створено CFD модель для розрахунку аеродинаміки та розповсюдження пилу на території промислового майданчика із застосуванням захисного бар'єру відповідного типу.

Рішення задачі аеродинаміки реалізовувалося шляхом чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (8)$$

Для оцінювання концентрації пилу на промисловому майданчику використовується наступне рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i). \quad (9)$$

Схема розрахункової області показана на рис. 14. На рис. 15 (а, б) показано результати комп'ютерного моделювання процесу переносу пилу на промисловому майданчику при відсутності захисного бар'єру та при розташуванні перфорованого бар'єру.

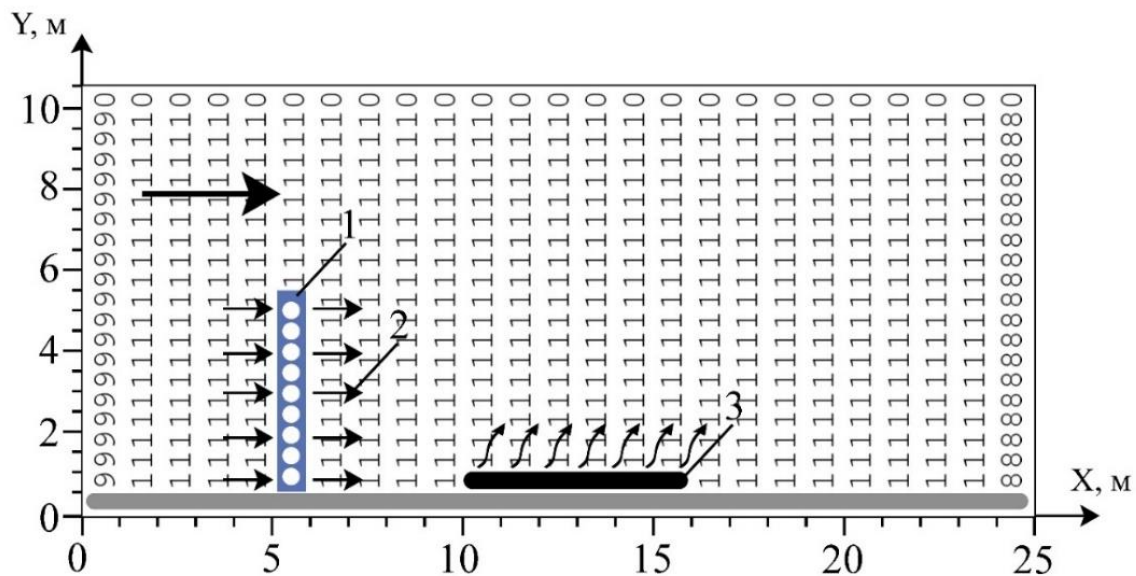
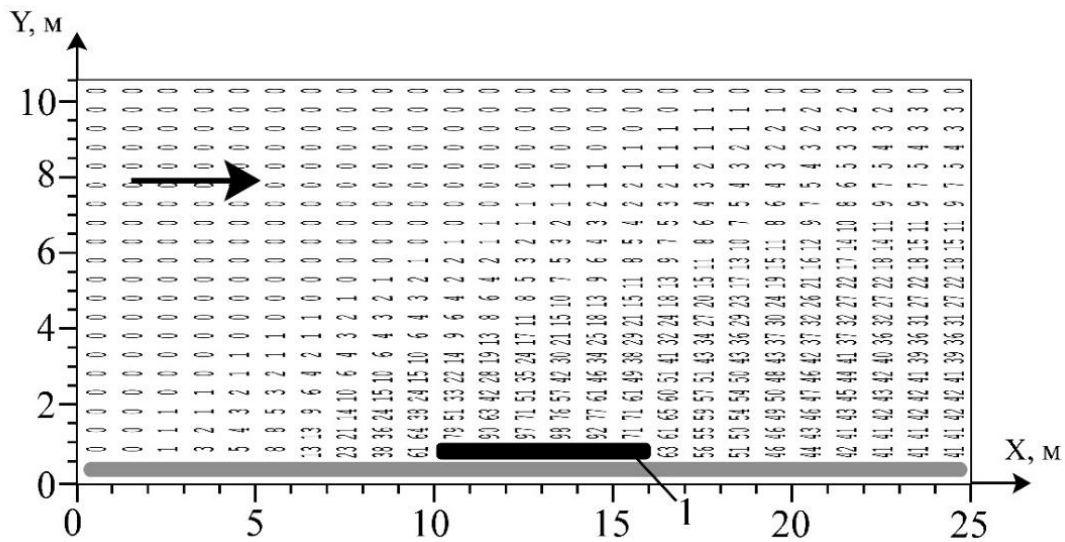
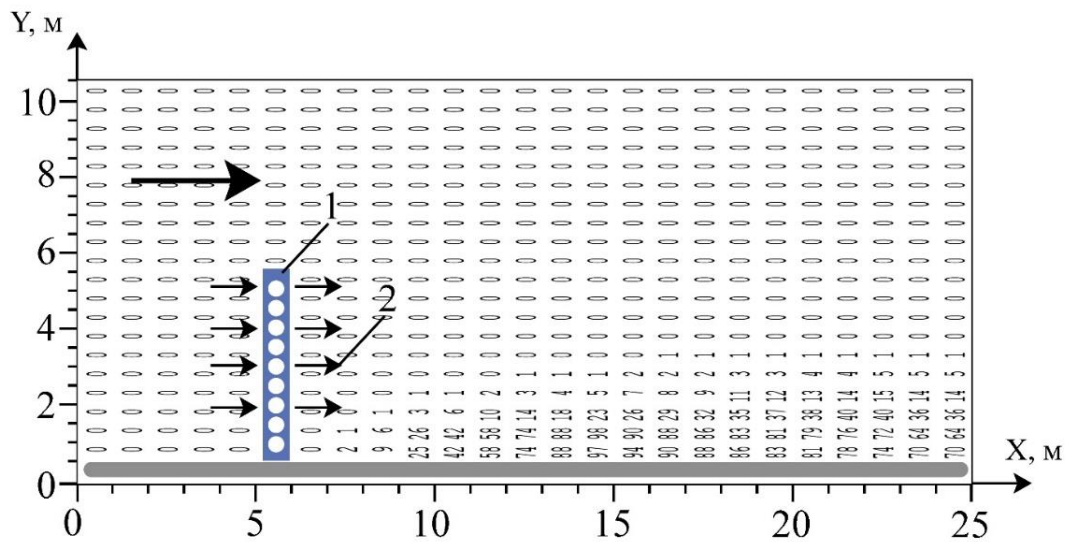


Рисунок 14 – Схема розрахункової області:

1 – бар'єр з перфорацією; 2 – потік крізь бар'єр; 3 – область пилоутворення.



а)



б)

Рисунок 15 – Концентрація пилу на промисловому майданчику (а – при відсутності захисного бар'єру, $C_{\max}=10,26$; б – при наявності захисного бар'єру, $C_{\max}=10,52$): 1 – бар'єр з перфорацією; 2 – потік крізь бар'єр).

Аналіз даних, представлених на рис. 15а, показує, що за відсутності захисного бар'єру утворюється значна за висотою зона пилового забруднення. У свою чергу, дані, представлені на рис. 15б, свідчать про те, що використання захисного повністю перфорованого бар'єру сприяє формуванню значно меншої за висотою зони пилового забруднення. Ця зона має форму шлейфу, що простягається уздовж поверхні землі, його висота становить приблизно 3 метри, а на висоті понад 2 метри концентрація пилу в повітрі зменшується до 1-5 % від максимальної, тобто пиловий шлейф щільно прилягає до поверхні землі.

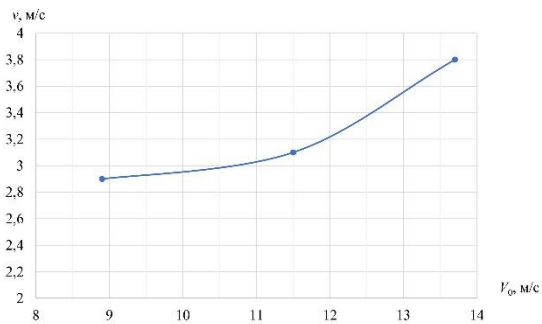
2. Частково перфорований (напівпроникний) бар'єр.

Проведені експериментальні дослідження для двох варіантів напівпроникних бар'єрів – напівпроникний бар'єр з перфорацією зверху (рис. 16а) та напівпроникний бар'єр з перфорацією знизу (рис. 16б).



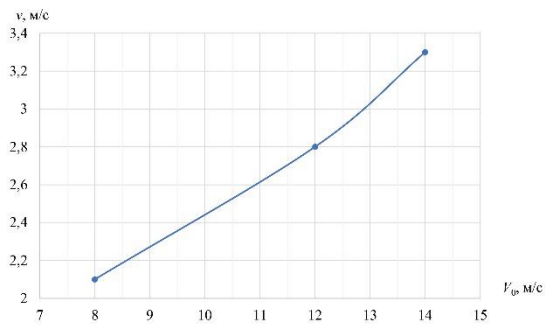
Рисунок 16 – Фото експериментальної установки (напівпроникний бар'єр): а – перфорація зверху; б – перфорація знизу.

На рис. 17 (а, б) наведені експериментальні дані щодо швидкості повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5Н (Н – висота бар'єру) та на висоті 0,1Н.



$$v = 1,7288 \cdot e^{0,0554 \cdot V_0}$$

а)

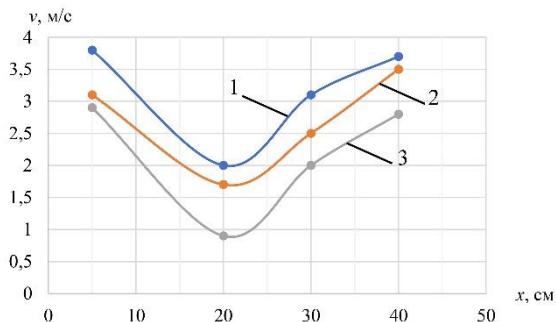


$$v = 1,1506 \cdot e^{0,0748 \cdot V_0}$$

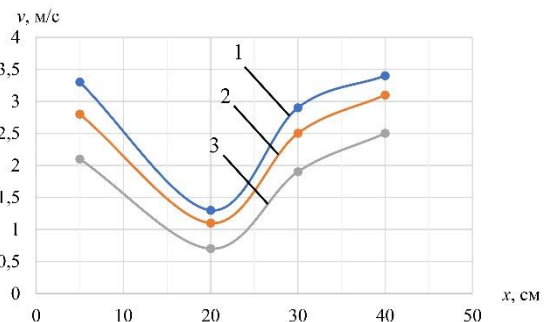
б)

Рисунок 17 – Швидкість повітряного потоку за напівпроникним бар'єром: а – перфорація зверху; б – перфорація знизу.

На рис. 18 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1Н вздовж промислового майданчика при різних швидкості повітряного потоку перед напівпроникним бар'єром.



а)



б)

Рисунок 18 – Швидкість повітряного потоку за напівпроникним бар'єром вздовж моделі промислового майданчику:

а – перфорація зверху: 1 – $V_0=13,7$ м/с; 2 – $V_0=11,5$ м/с; 3 – $V_0=8,9$ м/с;

б – перфорація знизу: 1 – $V_0=14$ м/с; 2 – $V_0=12$ м/с; 3 – $V_0=8$ м/с.

Апроксимація результатів експерименту дає можливість отримати наступні емпіричні моделі для визначення інтенсивності виносу вугільного пилу від забрудненої ділянки при використанні відповідних напівпроникних бар'єрів:

– перфорація зверху:

$$Q = 0,0015 \ln(V_0) - 0,003, \text{ г/}(\text{см}^2 \cdot \text{с});$$

– перфорація знизу:

$$Q = 8 \cdot 10^{-6} e^{0,2799 \cdot V_0}, \text{ Г/}(\text{см}^2 \cdot \text{с}).$$

Результати експериментальних досліджень свідчать про те, що інтенсивність виносу вугільного пилю від забрудненої ділянки при використанні частково перфорованих бар'єрів має такі закономірності:

1. При середній швидкості набігаючого потоку повітря порядку 8 м/с інтенсивність пилоутворення практично однакова для бар'єрів обох типів.

2. При збільшенні швидкості набігаючого потоку повітря від 10 м/с та більше бар'єр з перфорацією знизу дає можливість суттєво зменшити пилоутворення від забрудненої поверхні на промисловому майданчику, практично в 2,5-3 рази.

Таким чином, для практичного використання слід застосовувати бар'єр з перфорацією знизу.

На наступному етапі була розроблена CFD модель для рішення задачі аеродинаміки та поширення пилу на промисловому майданчику при використанні напівпроникного захисного бар'єру з перфорацією знизу (рис. 19).

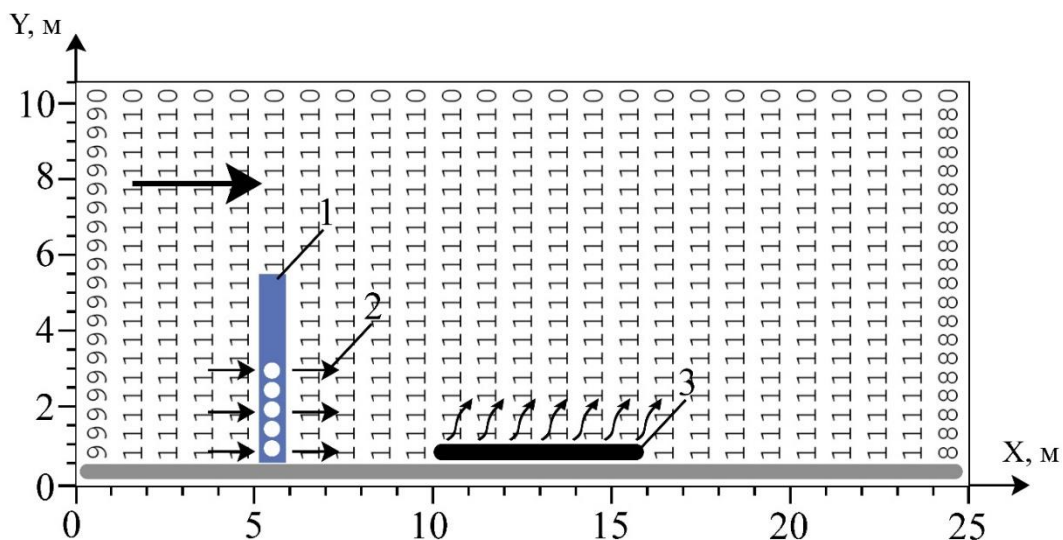


Рисунок 19 – Схема розрахункової області:

1 – бар’єр з частковою перфорацією; 2 – потік крізь бар’єр; 3 – область пилоутворення.

На рис. 20 представлено результати комп'ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при розташуванні бар'єру такого типу.

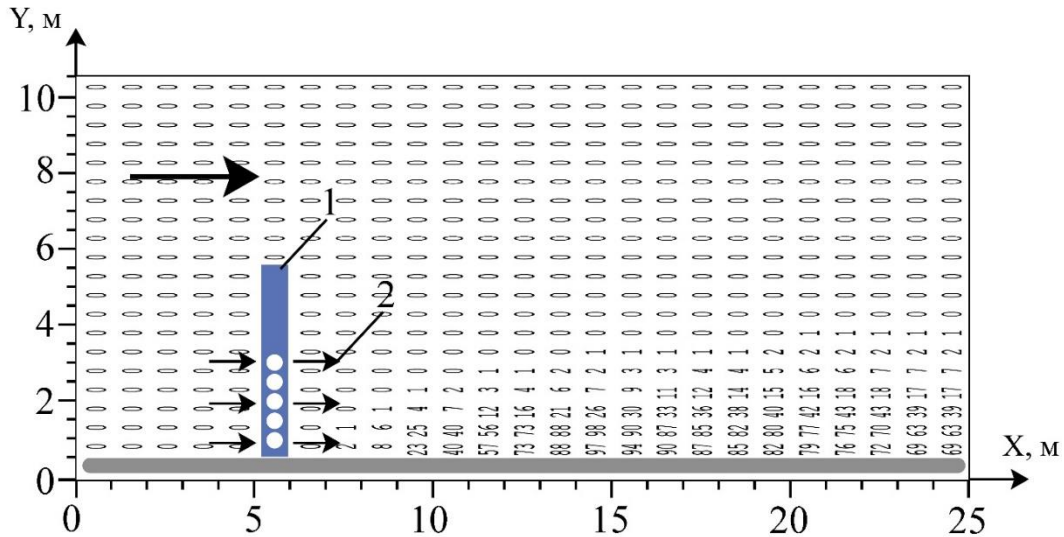


Рисунок 20 – Концентрація пилу на промисловому майданчику:
1 – бар'єр з частковою перфорацією; 2 – потік крізь бар'єр.

Аналіз даних, представлених на рис. 20, показує, що використання захисного бар'єру відповідного типу сприяє формуванню незначної за висотою зони пилового забруднення, висота якої становить приблизно 3,5 метри, а на висоті понад 2,5 метри концентрація пилу в повітрі зменшується до 1-2 % від максимальної, тобто пиловий шлейф щільно прилягає до поверхні землі.

3. Частково перфорований бар'єр складної форми.

Проведені експериментальні дослідження для двох варіантів частково перфорованих бар'єрів (перфорація зверху) складної форми – Г-подібний напівпроникний бар'єр, розташування горизонтального елемента на бар'єрі «по потоку» (рис. 21а) та Г-подібний напівпроникний бар'єр, розташування горизонтального елемента на бар'єрі «проти потоку» (рис. 21б).



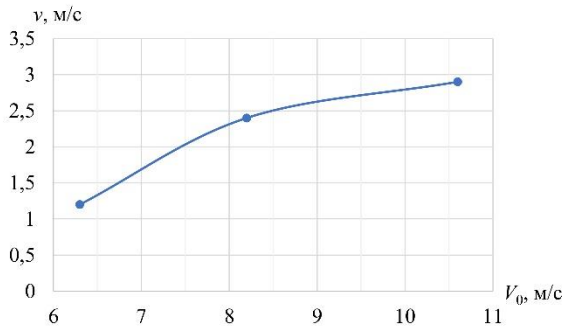
а)



б)

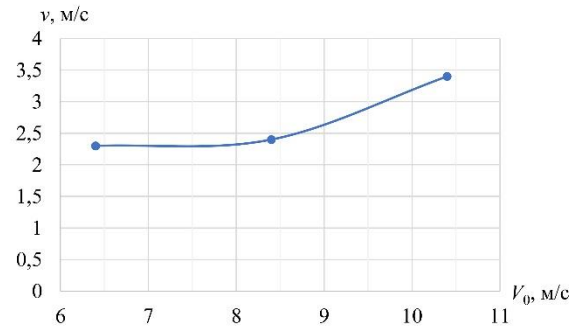
Рисунок 21 – Фото експериментальної установки (Г-подібний, напівпроникний бар'єр): а – розташування додаткового елемента «по потоку»; б – розташування додаткового елемента «проти потоку».

Результати проведених експериментальних досліджень по аналізу швидкості повітряного потоку при використанні Г-подібних, напівпроникних бар'єрів представлені на рис. 22.



$$v = -0,0984 \cdot V_0^2 + 2,0588 \cdot V_0 - 7,8638$$

а)

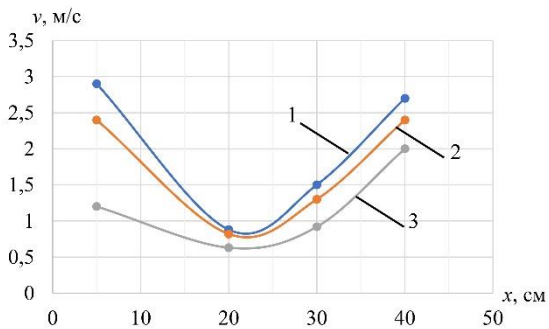


$$v = 0,1125 \cdot V_0^2 - 1,615 \cdot V_0 + 8,028$$

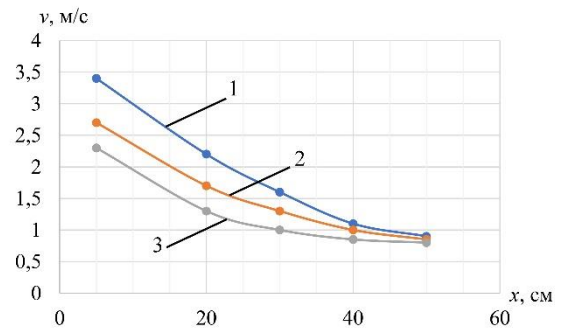
б)

Рисунок 22 – Швидкість повітряного потоку за Г-подібним, напівпроникним бар'єром: а – розташування додаткового елементу «по потоку»; б – розташування додаткового елементу «проти потоку».

На рис. 23 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1Н вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед Г-подібним напівпроникним бар'єром.



а)



б)

Рисунок 23 – Швидкість повітряного потоку вздовж моделі промислового майданчику за Г-подібним напівпроникним бар'єром з розташуванням додаткового елементу:

а – «по потоку»: 1 – $V_0=10,6$ м/с; 2 – $V_0=8,2$ м/с; 3 – $V_0=6,3$ м/с;

б – «проти потоку»: 1 – $V_0=10,4$ м/с; 2 – $V_0=8,4$ м/с; 3 – $V_0=6,4$ м/с.

Результати, що наведені на рис. 23а, показують, що швидкість повітряного потоку досягає мінімального значення на відстані 2Н від захисного бар'єру.

Якщо порівняти експериментальні дані, що наведені на рис. 23а та рис. 18б, то проведений експеримент дає можливість зробити висновок – використання додаткового горизонтального елементу на напівпроникному бар'єрі, перфорація знизу – не підвищує його ефективність (з точки зору зменшення швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику для зменшення пилоутворення).

Результати, що наведені на рис. 23б, показують, що швидкість повітряного потоку досягає мінімального значення на відстані 5Н від захисного бар'єру.

Якщо порівняти експериментальні дані, що наведені на рис. 23а (розташування додаткового елементу «по потоку») та на рис. 23б (розташування додаткового елементу «проти потоку»), то проведений експеримент дає можливість визначити таку закономірність:

1. При орієнтації додаткового горизонтального елементу «по потоку» функціональна залежність локальної швидкості повітряного потоку в залежності від швидкості набігаючого повітряного потоку має точку «перегину» на відстані 2Н від бар'єру: до цієї точки має місце зменшення локальної швидкості повітряного потоку біля поверхні майданчика, а далі – збільшення локальної швидкості повітряного потоку.

2. При орієнтації додаткового горизонтального елемента «проти потоку» функціональна залежність локальної швидкості повітряного потоку в залежності від швидкості набігаючого повітряного потоку не має точки «перегину» на ділянці, що розглядається: локальна швидкість повітряного потоку біля поверхні майданчика поступово зменшується, тобто має місце «плавна» зміна швидкості, без утворення локальних областей «збурення».

На наступному етапі була розроблена CFD модель для рішення задачі аеродинаміки та поширення пилу на промисловому майданчику при використанні Г-подібного напівпроникного захисного бар'єру з додатковим елементом «проти потоку» (рис. 24).

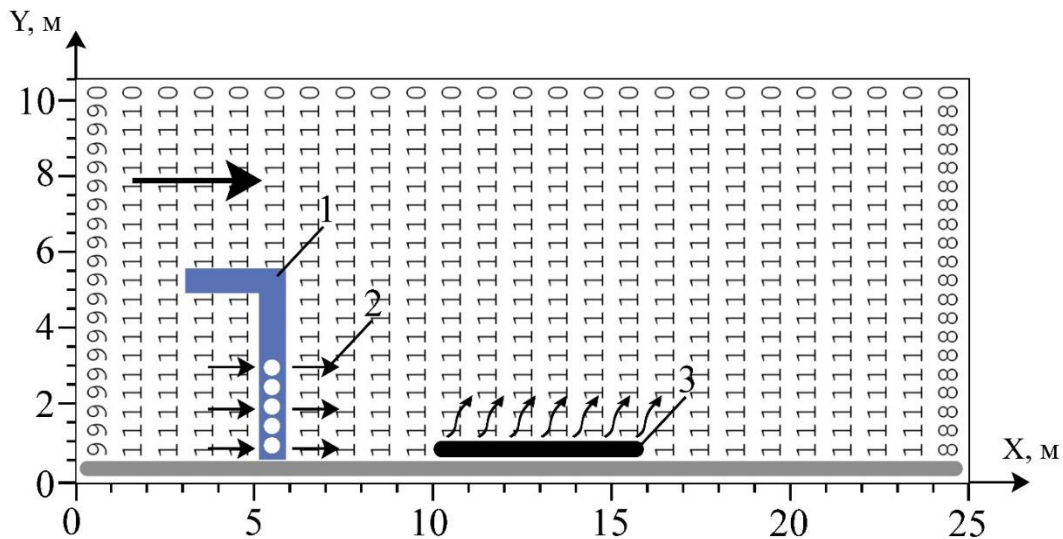


Рисунок 24 – Схема розрахункової області:

1 – Г-подібний напівпроникний бар'єр з додатковим елементом «проти потоку»; 2 – потік через бар'єр; 3 – область пилоутворення.

На рис. 25 представлено результати комп'ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при розташуванні Г-подібного напівпроникного бар'єру з додатковим елементом «проти потоку».

Результати проведених експериментальних досліджень по аналізу швидкості повітряного потоку при використанні криволінійних бар'єрів представлені на рис. 27.

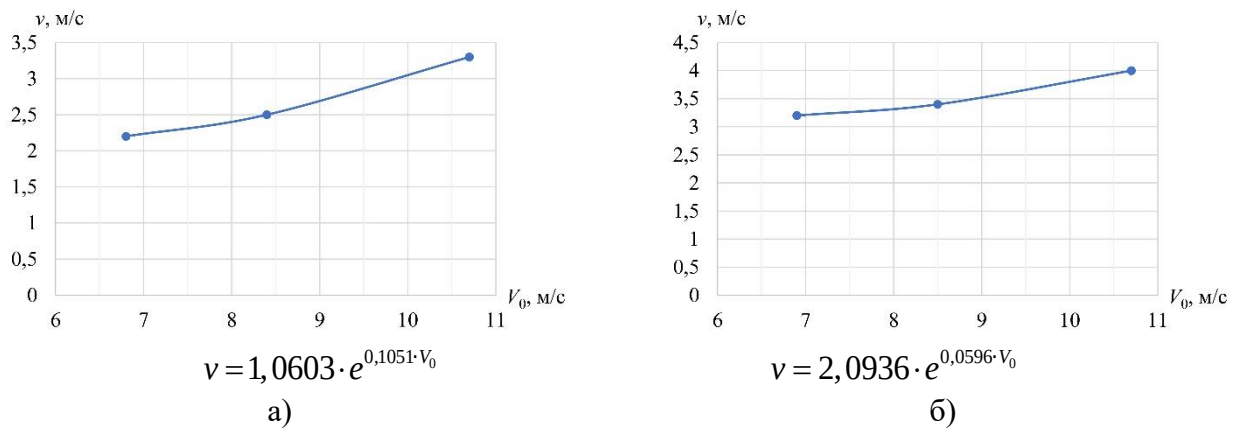


Рисунок 27 – Швидкість повітряного потоку за криволінійним бар'єром:
а – ввігнутість «проти потоку»; б – ввігнутість «по потоку».

На рис. 28 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1Н вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед криволінійним бар'єром.

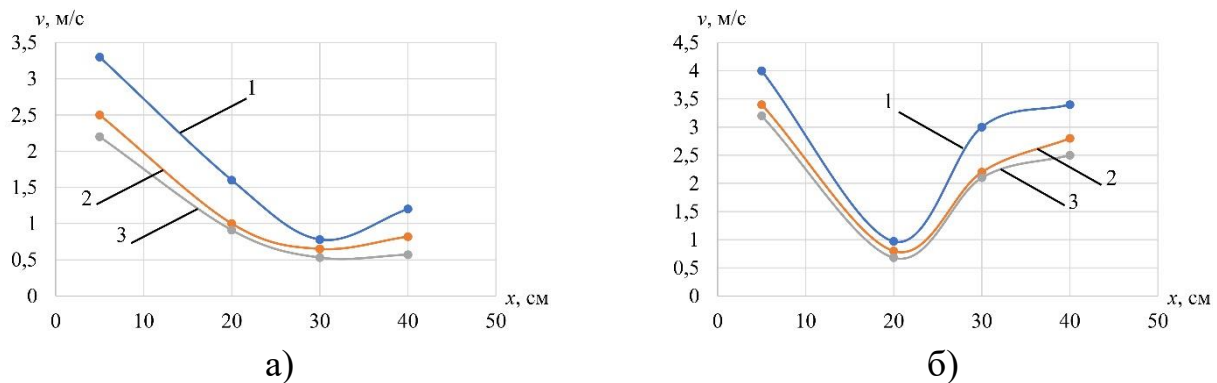


Рисунок 28 – Швидкість повітряного потоку вздовж моделі промислового майданчику за криволінійним бар'єром:

а – ввігнутість «проти потоку»: 1 – 10,7 м/с; 2 – 8,4 м/с; 3 – 6,8 м/с;
б – ввігнутість «по потоку»: 1 – 10,7 м/с; 2 – 8,5 м/с; 3 – 6,9 м/с.

Результати, представлені на рис. 28а, дозволяють встановити таку закономірність: за захисним бар'єром швидкість повітряного потоку знижується, досягаючи мінімального значення на відстані 3Н від бар'єра. Після цього спостерігається збільшення локальної швидкості повітряного потоку. Результати, представлені на рис. 28б, дозволяють встановити таку закономірність: за захисним бар'єром швидкість повітряного потоку знижується, досягаючи мінімального значення на відстані 3Н від бар'єра. Після цього спостерігається збільшення локальної швидкості повітряного потоку.

На наступному етапі побудовано CFD модель для аналізу рівня забруднення повітря пилом на промисловому майданчику з урахуванням використання криволінійного захисного бар'єру (рис. 29).

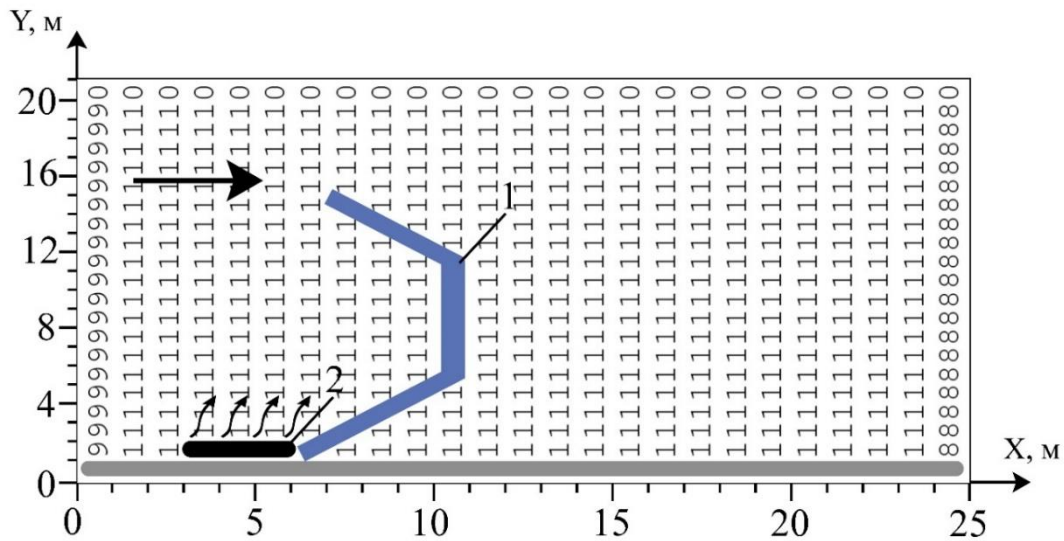


Рисунок 29 – Схема розрахункової області:

1 – криволінійний бар'єр, ввігнутість бар'єру «по потоку»; 2 – область пилоутворення.

На рис. 30 представлено результати комп'ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при розташуванні криволінійного захисного бар'єру з ввігнутістю бар'єру «по потоку».

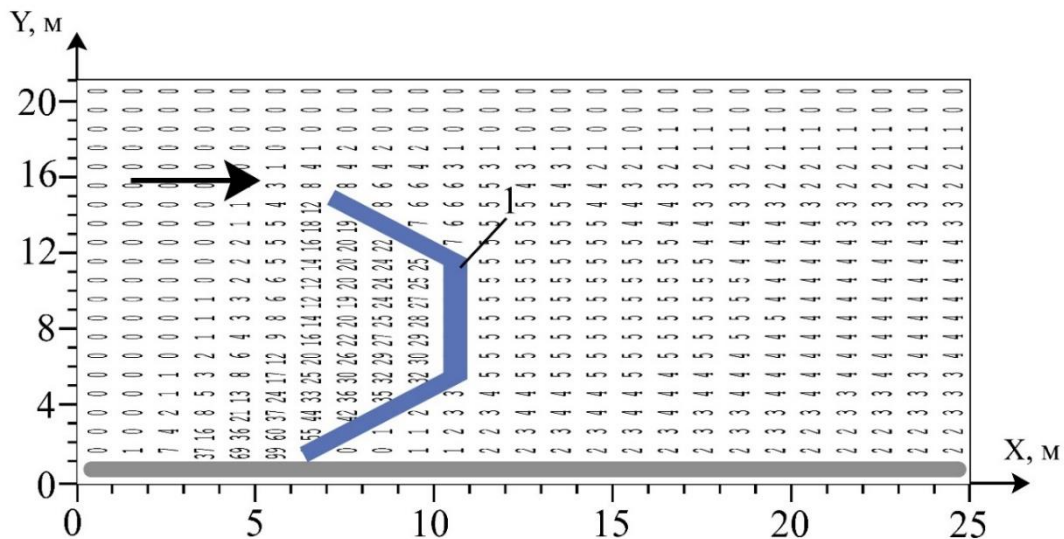


Рисунок 30 – Поле концентрації пилу на промисловому майданчику, ввігнутість криволінійного бар'єру «по потоку».

Аналіз результатів комп'ютерного моделювання (рис. 30) показує, що значна частина пилу затримується захисним бар'єром. Так, концентрація пилу перед захисним бар'єром знаходиться в межах 19-55 % від максимальної

концентрації. За захисним бар'єром концентрація пилу знаходиться в межах 2-5 %. Концентрація пилу за бар'єром на висоті порядку 15 м дорівнює 1-3 %.

2. Бар'єр, що має додатковий горизонтальний елемент типу «шафа».

Розгадалися два варіанти розташування елемента типу «шафа» – «проти потоку» (рис. 31а) та «по потоку» (рис. 31б).



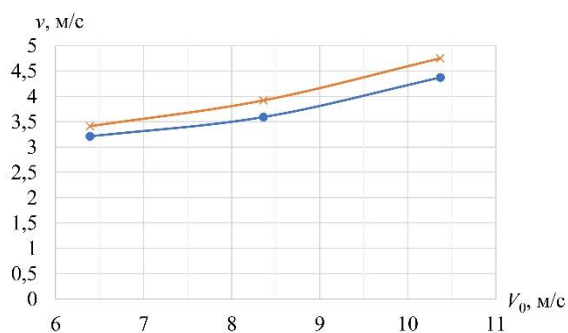
а)



б)

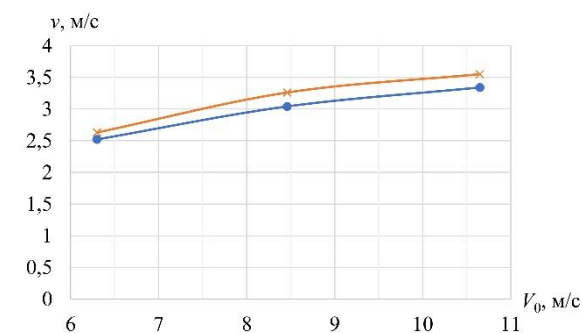
Рисунок 31 – Фото моделі захисного бар'єру з розташуванням елемента типу «шафа»: а – «проти потоку»; б – «по потоку».

Результати проведених експериментальних досліджень по аналізу швидкості повітряного потоку при використанні бар'єрів з додатковим горизонтальним елементом типу «шафа» представлена на рис. 32.



$$v = 0,049V_0^2 - 0,5304 \cdot V_0 + 4,597$$

а)



$$v = -0,0239V_0^2 + 0,5928 \cdot V_0 - 0,2679$$

б)

Рисунок 32 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром: а – додатковий елемент розташовано «проти потоку»; б – додатковий елемент розташовано «по потоку»; × – розрахунок за розробленою моделлю.

На рис. 33 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1Н вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед бар'єром з додатковим горизонтальним елементом типу «шафа».

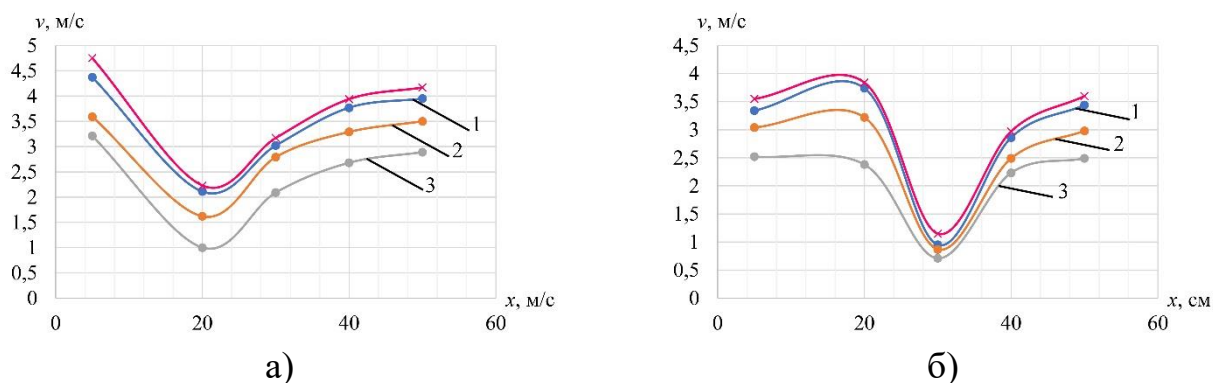


Рисунок 33 – Швидкість повітряного потоку вздовж моделі промислового майданчику за бар'єром з додатковим горизонтальним елементом типу «шафа»:

а – «проти потоку»: 1 – 10,37 м/с; 2 – 8,36 м/с; 3 – 6,39 м/с;

б – «по потоку»: 1 – 10,65 м/с; 2 – 8,46 м/с; 3 – 6,33 м/с;

× – розрахунок за розробленою моделлю.

Результати, що наведено на рис. 33а, дають можливість встановити таку закономірність: за захисним бар'єром швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані $2H$ від захисного бар'єру, а далі починається зростання локальної швидкості повітряного потоку. Результати, що наведено на рис. 33б, дають можливість встановити таку закономірність: після захисного бар'єру швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані $3H$ від захисного бар'єру, а далі починається інтенсивне зростання локальної швидкості повітряного потоку до точки, що розташована на відстані $4H$ від захисного бар'єру.

На наступному етапі побудовано CFD модель для аналізу рівня забруднення повітря пилом на промисловому майданчику з урахуванням використання бар'єру з додатковим горизонтальним елементом типу «шафа», що розташований «проти потоку» (рис. 34).

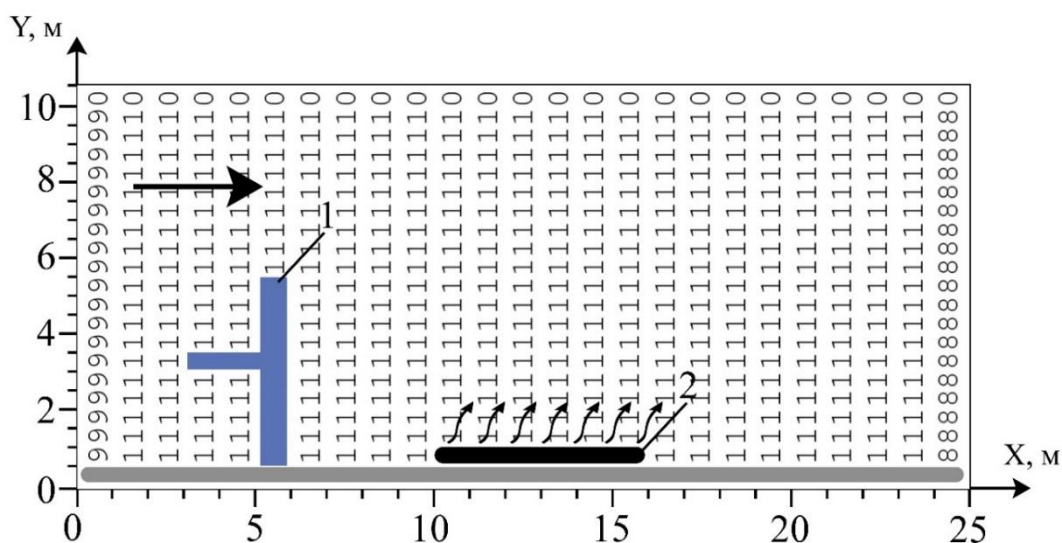


Рисунок 34 – Схема розрахункової області:

1 – бар'єр з горизонтальним елементом «проти потоку»; 2 – область пилоутворення.

На рис. 35 представлено результати комп'ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при розташуванні бар'єру з додатковим горизонтальним елементом типу «шафа», що розташований «проти потоку».

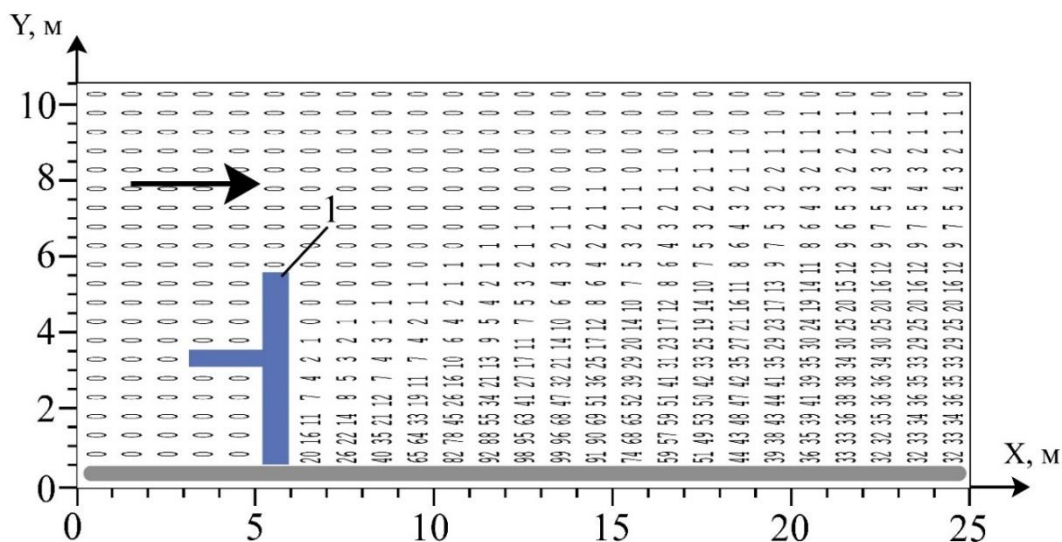


Рисунок 35 – Поле концентрації пилу на промисловому майданчику:
1 – захисний бар'єр.

Аналіз даних, що наведено на рис. 35, показує, що при використанні захисного бар'єру такого типу, на відстані порядку 20 м від бар'єру, формується область забруднення, яка вище висоти бар'єру. На відстані порядку 20 м від бар'єру, в межах 2 м від поверхні майданчика, концентрація пилу в повітрі дорівнює 30-36 % від максимальної концентрації. Форма області пилового забруднення – це «шлейф», що притискається до поверхні землі.

Далі було розраховано показник ризику потенційної небезпеки HQ (Hazard Quotient) для таких умов:

1. Відсутній захисний бар'єр.
2. Наявний захисний бар'єр.
3. Голова працівника знаходиться на висоті 1,7 м.
4. Працівник знаходиться на відстані 8 м від бар'єру.
5. Довжина ділянки пилоутворення 7 м.
6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,001 см/с.

В табл. 1 показано результати розрахунку HQ . В якості референтної концентрації для пилу використовувалось значення 5 мг/м³.

Таблиця 1 – Значення показника ризику потенційної небезпеки HQ

HQ	Відсутній бар'єр	Наявний захисний бар'єр
При $v=8$ м/с	0,94	0,14

Аналізуючи дані з табл. 1, можна зробити висновок – використання захисного бар'єру такої форми дає можливість значно зменшити ризик появи захворювання у працівників.

3. Бар'єр, що має додатковий горизонтальний елемент типу «сходинка» (рис. 36).

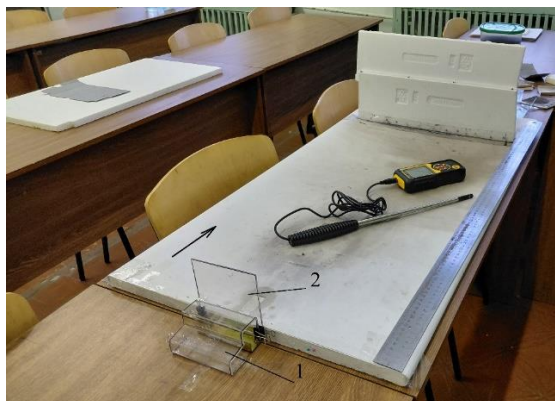


Рисунок 36 – Фото моделі захисного бар'єру, що має додатковий елемент типу «сходинка»: 1 – «сходинки»; 2 – захисний бар'єр.

На рис. 37 показано значення швидкості повітряного потоку за бар'єром. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті $0,1H$.

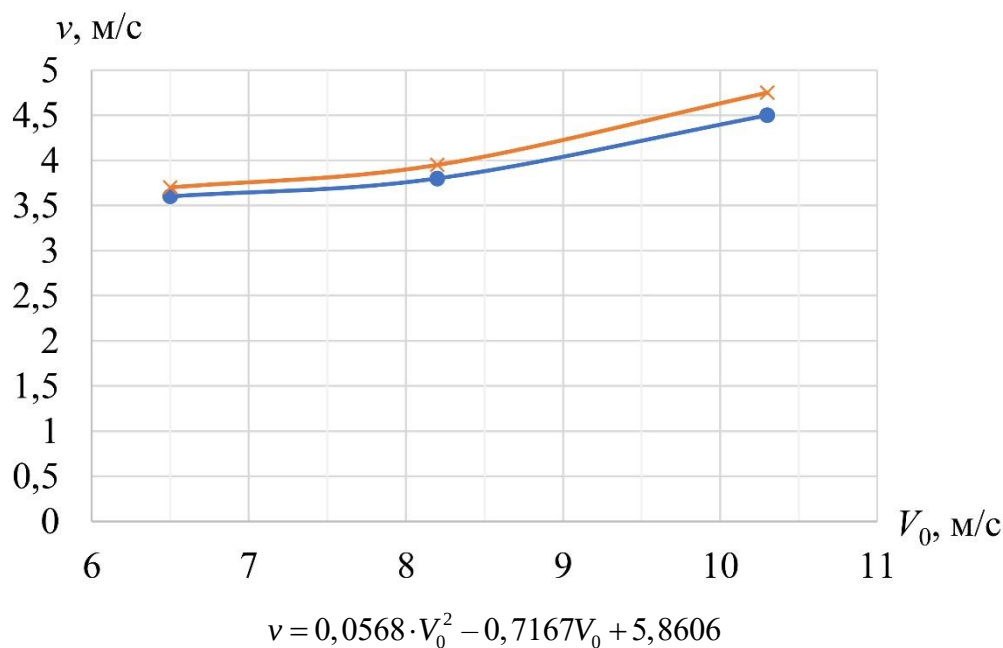


Рисунок 37 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром:
× – розрахунок за розробленою моделлю.

На рис. 38 показано зміну значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром вздовж моделі промислового майданчика. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті $0,1H$.

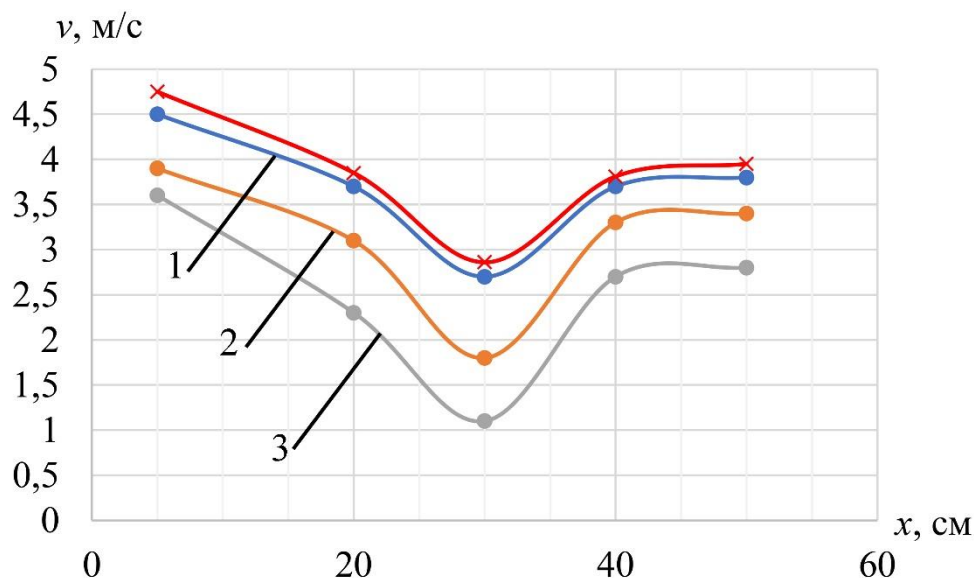


Рисунок 38 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром:
1 – 10,3 м/с; 2 – 8,2 м/с; 3 – 6,5 м/с; × – розрахунок за розробленою моделлю
($V_0=10,3$ м/с).

Результати, що наведені на рис. 38, дають можливість визначити таку закономірність: за захисним бар'єром такого типу швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані порядку $3H$ від захисного бар'єру, далі починається зростання локальної швидкості повітряного потоку.

Далі були побудовані чисельні моделі для розрахунку концентраційних полів пилу на промисловому майданчику при використанні захисного бар'єру, що має додатковий горизонтальний елемент типу «сходи́нка» (рис. 39).

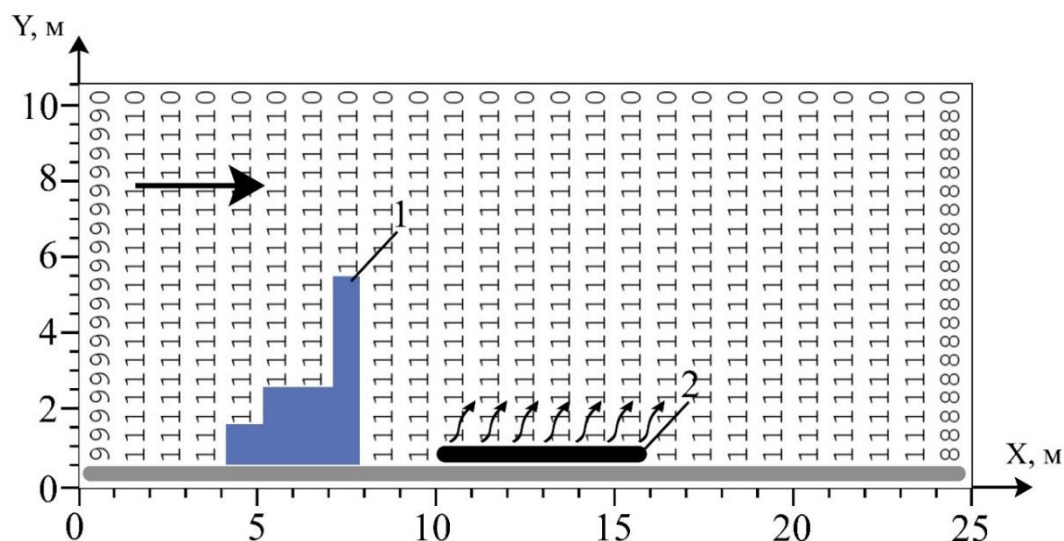


Рисунок 39 – Схема розрахункової області:
1 – захисний бар'єр; 2 – область пилоутворення.

На рис. 40 представлено результати комп'ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення

повітря на промисловому майданчику при розташуванні бар'єру з додатковим горизонтальним елементом типу «сходи́нка».

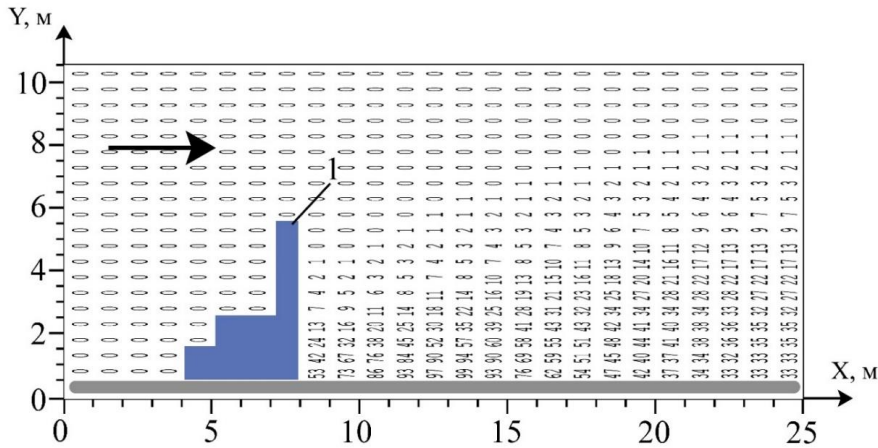


Рисунок 40 – Поле концентрації пилу на промисловому майданчику:
1 – захисний бар'єр.

В шостому розділі розглядається рішення комплексу прикладних задач, пов'язаних з оцінюванням рівня небезпеки на промислових майданчиках при вибухах дронів та наслідків таких вибухів.

Розглядається задача розльоту уламків при вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані нафтосховища. Для захисту корпусу нафтосховища від метальної дії уламків розглядається використання захисної споруди (металевої пластини, габіону) як захисної перешкоди.

Траєкторію руху уламку від місця вибуху до об'єкту розбиваємо на три частини:

- 1) зона № 1 – від місця вибуху до перешкоди;
- 2) зона № 2 – рух уламку всередині захисної перешкоди;
- 3) зона № 3 – рух уламку від захисної перешкоди до об'єкту (якщо уламок пройде зону № 2).

Динаміку руху уламку в першій та третій зоні будемо описувати за допомогою другого закону Ньютона:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{F}_R - \vec{F}_g, \quad (10)$$

де m – маса уламка; $\vec{V}$ – вектор швидкості руху уламку в середовищі; $\vec{F}_g = m\vec{g}$ – сила тяжіння; $\vec{F}_R = C_x \frac{\rho_s V^2}{2} \cdot S \cdot \frac{\vec{V}}{V}$ – сила опору уламка; C_x – коефіцієнт опору уламка; ρ_s – щільність середовища; S – площа міделового перерізу уламка; t – час.

Товщина перешкоди, при якій має місце повна втрата швидкості уламку, визначається на базі емпіричної моделі:

$$h_* = \frac{0.138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}, \quad (11)$$

де d_1 – діаметр уламку; ρ_1 – щільність матеріалу уламку; V – швидкість руху уламку; σ_2 – динамічна межа текучості матеріалу перешкоди; ρ_2 – щільність матеріалу перешкоди.

Якщо товщина перешкоди h_2 буде менш ніж h_* , тоді швидкість уламка на виході з перешкоди (заперешкодна швидкість) визначається так:

$$V_\lambda = V \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_*}\right). \quad (12)$$

Якщо буде така ситуація, то далі приймається, що з такою швидкістю уламок починає рухатися від захисної перешкоди в напрямку нафтоховища.

На ділянку стінки об'єкта, де є взаємодія з уламком, буде діяти сила F_w , яка визначається згідно з другим законом Ньютона так:

$$F_w = \frac{mV_w}{dt},$$

де V_w – швидкість руху уламка при зіткненні зі стінкою.

В прийнятій моделі ця сила прикладена до частини поверхні стінки об'єкту, яка має площу S , тоді уламок при взаємодії зі стінкою створює тиск:

$$p_w = \frac{F_w}{S}. \quad (13)$$

Якщо межа міцності матеріалу стінки об'єкту дорівнює σ , то можна записати умову руйнування стінки:

$$p_w \geq \sigma. \quad (14)$$

Здійснено програмування чисельної моделі та створено код «Drop». Мова програмування – FORTRAN.

Розроблені чисельні моделі були використані для рішення комплексу прикладних задач.

Перша задача – визначення ефективності металевої перешкоди для захисту корпусу нафтоховища від дії уламків.

На рис. 41 показано величину швидкості V_2 уламка біля стінки нафтоховища, коли в якості захисної перешкоди був використаний сталевий лист товщиною 1 мм.

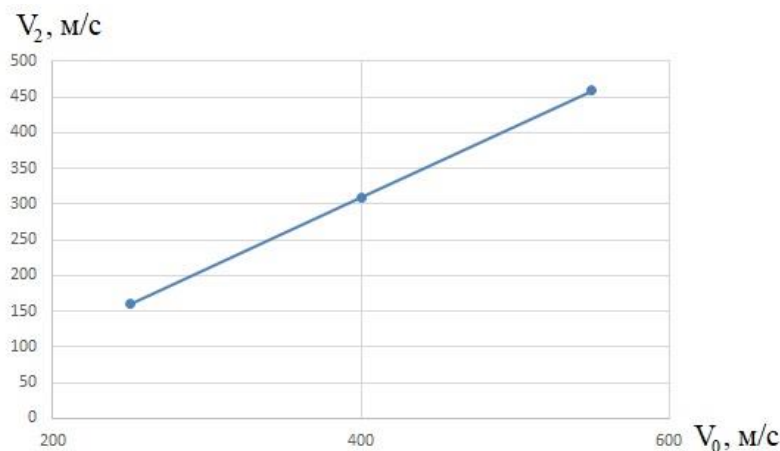


Рисунок 41 – Швидкість V_2 , з якою уламок стикається зі стінкою нафтоховища в залежності від початкової швидкості V_0 уламка (при наявності захисної перешкоди).

Як видно з рис. 41, сталевий лист вибраної товщини не забезпечує зупинку уламка, тобто уламок «проходить» цю захисну перешкоду та продовжує рухатися до нафтосховища. Швидкість уламка V_2 біля стінки нафтосховища дуже велика, що неминуче призведе до негативних наслідків.

На рис. 42 показано мінімальне значення товщини захисної перешкоди для різних значень початкової швидкості руху уламку та при його діаметрі 0,03 м.

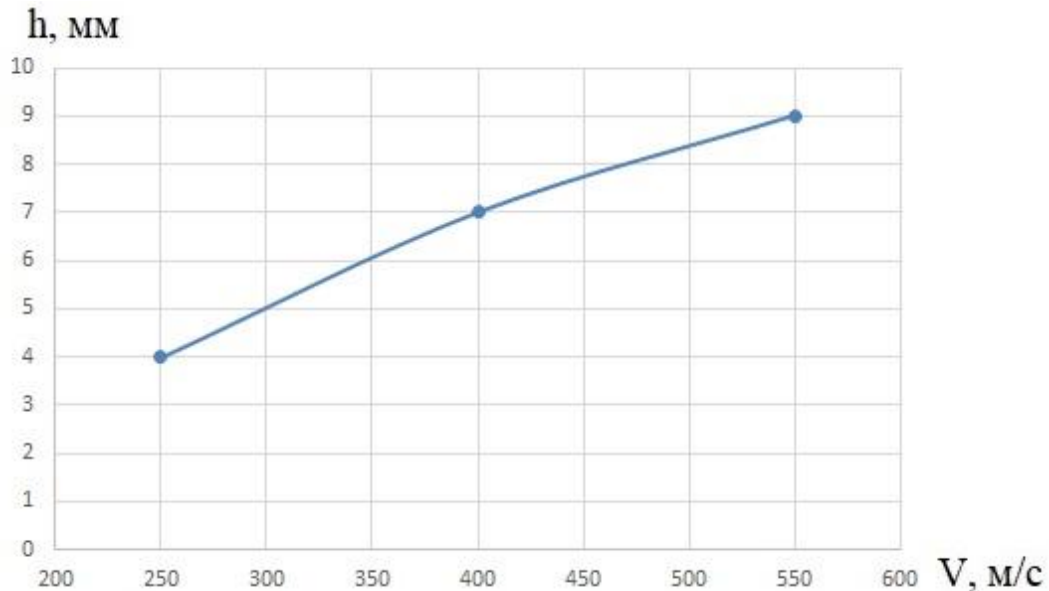


Рисунок 42 – Мінімальне значення товщини захисної перешкоди при різних швидкості уламку.

Аналіз даних, що наведені на рисунках, показує, що в рамках розглянутого діапазону початкової швидкості уламка та його розмірів захисна металева перешкода, яка має товщину 1 мм, не забезпечує захист нафтосховища від ураження.

Далі розглядається задача розльоту уламків при вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані габіони з різним наповненням біля нафтосховища.

Було здійснено побудову чисельної моделі та створено код, за допомогою яких були проведені параметричні дослідження по визначенню ефективності використання габіону для двох сценаріїв.

1^й сценарій: тіло габіону – мокрий пісок, щільність $\rho=1920 \text{ кг/м}^3$.

Результати обчислювального експерименту показані в табл. 2 та табл. 3.

Таблиця 2 – Значення заперешкодної швидкості уламка (маса уламка 0,03 кг)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
200 м/с	0,08 м/с	0,96 м
500 м/с	0,08 м/с	1,05 м
800 м/с	0,08 м/с	1,10 м

Таблиця 3 – Значення заперешкодної швидкості уламка (маса уламка 0,07 кг)

Початкова швидкість уламку	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
200 м/с	0,18 м/с	2,01 м
500 м/с	0,19 м/с	2,25 м
800 м/с	0,19 м/с	2,37 м

Аналіз даних з табл. 2 та табл. 3 показує, що для уламка масою 0,03 кг товщина габіону порядку 1,1 м, з даним наповнювачем, може бути ефективним. Для уламка масою 0,07 кг ефективним є товщина габіону порядку 2,4 м.

2^й сценарій: тіло габіону містить різні наповнювачі – тирса деревна, макуха, земля суха.

Результати розрахунку для даних параметрів показані в табл. 4-6.

Таблиця 4 – Значення заперешкодної швидкості уламка (наповнювач – тирса деревна)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
200 м/с	0,16 м/с	2,65 м
500 м/с	0,25 м/с	2,98 м
800 м/с	0,25 м/с	3,15 м

Таблиця 5 – Значення заперешкодної швидкості уламка (наповнювач – макуха)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
200 м/с	0,17 м/с	1,89 м
500 м/с	0,17 м/с	2,11 м
800 м/с	0,17 м/с	2,22 м

Таблиця 6 – Значення заперешкодної швидкості уламка (наповнювач – земля суха)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
200 м/с	0,09 м/с	1,09 м
500 м/с	0,09 м/с	1,21 м
800 м/с	0,09 м/с	1,26 м

Як видно з табл. 4-6, на ефективність затримання уламку суттєво впливає щільність матеріалу в тілі габіону. Так, якщо використовується тирса деревна, то для розглянутих параметрів товщина габіону порядку 3 м не є ефективною. При використанні в якості матеріалу наповнювача сухої землі можна використовувати габіон товщиною порядку 1,3 м.

Далі розглядається вибух дрона та розліт уламків на промисловому майданчику. Розглянуто два сценарії.

Перший сценарій: $\rho=1600 \text{ кг/м}^3$ – густина піску в габіоні (сухий пісок); початкова швидкість фрагмента змінюється: 300 м/с; 450 м/с; 600 м/с. Результат моделювання показано в табл. 7.

Таблиця 7 – Значення швидкості уламку за габіоном (сценарій №1)

Початкова швидкість	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
300 м/с	0,15 м/с	1,86 м
450 м/с	0,16 м/с	1,95 м
600 м/с	0,16 м/с	2,01 м

Як можна бачити з табл. 7, ефективним буде габіон, що має товщину порядку 2 м.

Другий сценарій: початкова швидкість фрагмента 700 м/с; щільність піску в габіоні змінюється: $\rho=1600 \text{ кг/м}^3$ (сухий пісок); $\rho=1920 \text{ кг/м}^3$ (мокрый пісок); $\rho=2080 \text{ кг/м}^3$ (мокрый, стиснутий пісок). Результати розрахунків для другого сценарію наведено в табл. 8.

Таблиця 8 – Значення швидкості уламку за габіоном (сценарій № 2)

Тип піску в габіоні	Заперешкодна швидкість V_b	Товщина габіону
Сухий пісок	0,16 м/с	2,03 м
Мокрий пісок	0,14 м/с	1,72 м
Мокрий, стиснутий пісок	0,14 м/с	1,58 м

Згідно з результатами, наведеними в табл. 8, можна стверджувати, що при використанні вологого, стиснутого піску в тілі габіону його товщину можна зменшити приблизно на 20 %.

Далі розглядається розробка математичних моделей по визначенню ефективності використання та час можливого руйнування захисних засобів для зменшення ризику термічного ураження працівників та об'єктів на промисловому майданчику. При виникненні пожежі на промисловому майданчику для захисту об'єктів можуть використовуватися різного роду конструкції – стінки, габіони тощо. Ця задача потребує рішення двох пов'язаних «підзадач»:

1. Прогнозування динаміки формування теплових полів на промисловому майданчику та біля захисної стінки.

2. Розрахунок процесу нестационарної теплопровідності крізь захисну конструкцію (стінку) та визначення часу, коли, внаслідок нагріву стінки, може початися її руйнування.

Для математичного моделювання процесу теплового забруднення повітря на промисловому майданчику при пожежі застосовується наступне рівняння:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (15)$$

де T – температура повітря на промисловому майданчику; a_x, a_y – коефіцієнти теплопровідності повітря; u, v – компоненти вектора швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику; t – час.

Для визначення поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику використовується модель потенціального руху, моделююче рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \quad (16)$$

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Для розрахунку ступеня прогрівання захисного бар'єру використовується рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \left(a_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right), \quad (17)$$

де T – температура всередині бар'єру (стінки); a_x – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки; t – час.

Була розглянута задача – розрахунок температурного поля на промисловому майданчику при використанні габіону, як методу захисту від температурного навантаження. Розглядалися такі сценарії:

1. Захисний габіон відсутній (сценарій № 1).
2. Захисний габіон, що має висоту 4 м (сценарій № 2).
3. Захисний габіон, що має висоту 8 м (сценарій № 3).

Поле температури на промисловому майданчику показано на рис. 43-45.

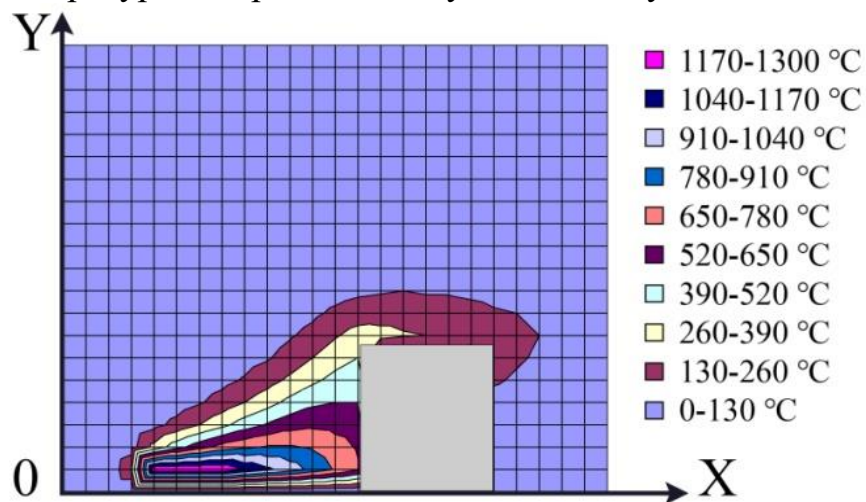


Рисунок 43 – Зона теплового забруднення (сценарій № 1).

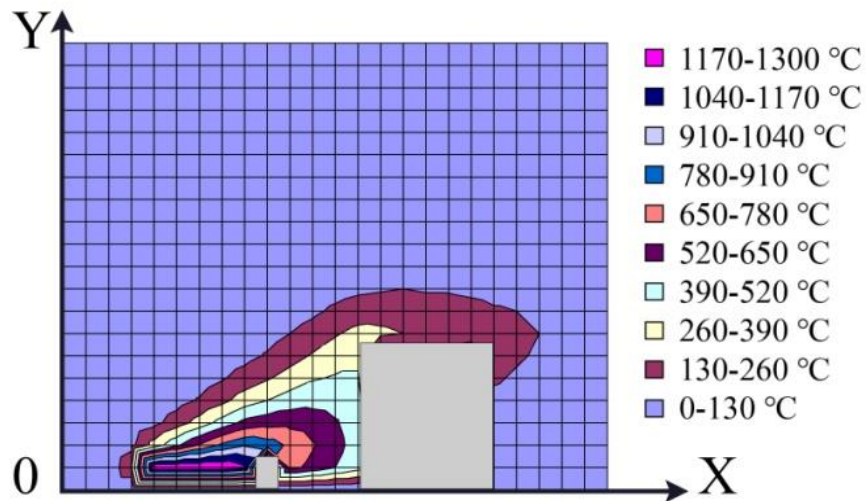


Рисунок 44 – Зона теплового забруднення (сценарій № 2).

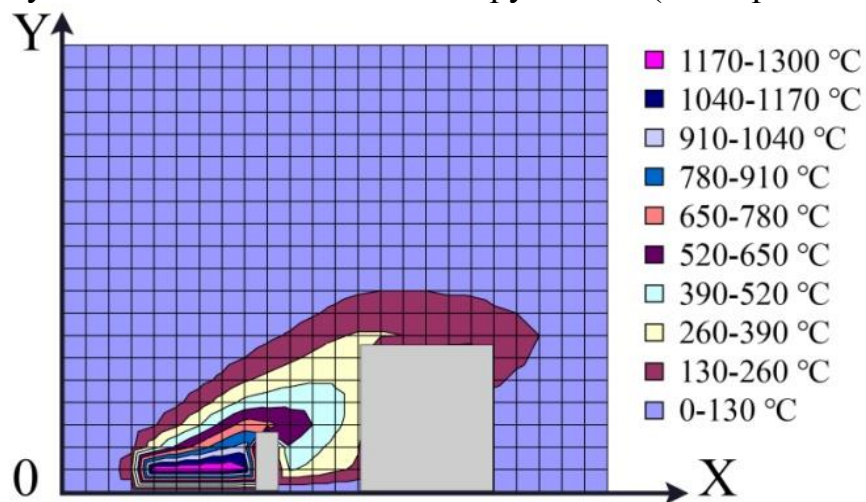


Рисунок 45 – Зона теплового забруднення (сценарій № 3).

З наведених вище рисунків видно, що температура повітря на навітряній стіні сховища, за відсутності екрану, змінюється від 663 °C (у нижній частині) до 390 °C (у верхній частині). За наявності екрану висотою 4 м температура змінюється від 442 °C (у нижній частині) до 364 °C (у верхній частині). За наявності екрану висотою 8 м температура змінюється від 234 °C (у нижній частині) до 325 °C (у верхній частині). Таким чином, екран ефективно знижує температуру в нижній частині стінки сховища за розглянутих сценаріїв.

Далі розглядається актуальна проблема захисту стінок резервуарів з нафтопродуктами від теплового впливу, коли має місце займання нафтопродуктів в сусідньому резервуарі. Була побудована експрес-модель для рішення наступної задачі – «пілотного» оцінювання ефективності захисту стінок резервуару від теплового навантаження при виникненні пожежі на промисловому майданчику.

Нижче наведені результати рішення модельної задачі. Розглядається рух нагрітого повітря на ділянці промислового майданчика, де розташоване нафтосховище (резервуар), рис. 46. Метою проведення обчислювального

експерименту є експрес оцінювання ефективності різних інженерних рішень по захисту від нагріву корпусу резервуара.



Рисунок 46 – Схема формування теплової хвилі на промисловому майданчику.

Розглядаються такі сценарії проведення комп'ютерного експерименту:

- сценарій № 1: відсутній захист на промисловому майданчику;
- сценарій № 2: наявний захисний бар'єр біля нафтохранилища;
- сценарій № 3: наявний захисний бар'єр біля нафтохранилища + вдув повітря (швидкість 15 м/с) з температурою 5 °С;
- сценарій № 4: наявний захисний бар'єр біля нафтохранилища + вдув повітря (швидкість 15 м/с) з температурою 5 °С + екран над нафтохранилищем.

Результати розрахунку за розробленою моделлю представлено на рис. 47-50.

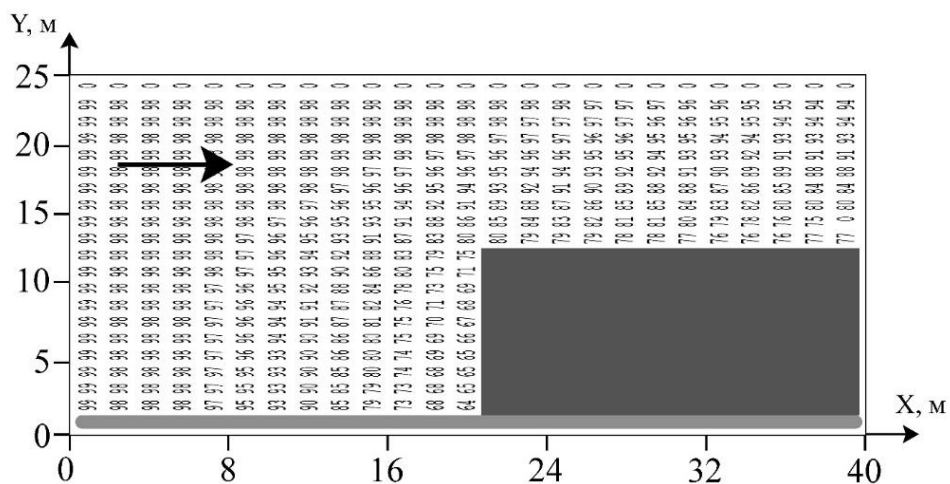


Рисунок 47 – Поле температури, $t=18$ с, сценарій № 1 – відсутня система захисту нафтохранилища.

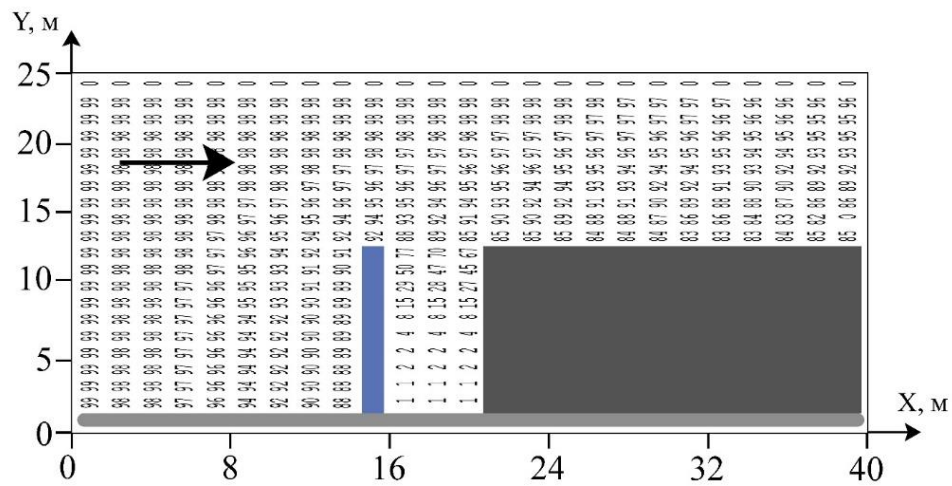


Рисунок 48 – Поле температури, $t=18$ с, сценарій № 2 – наявний захисний бар'єр біля нафтоскховища.

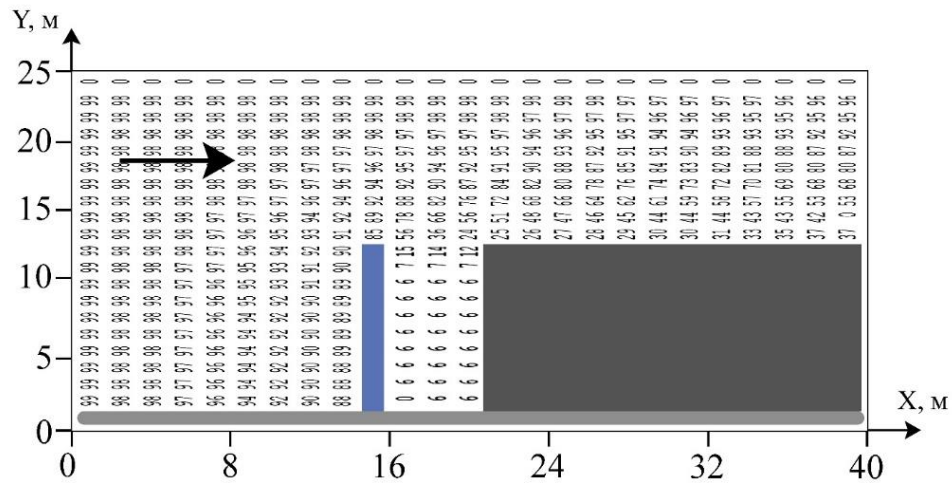


Рисунок 49 – Поле температури, $t=18$ с, сценарій № 3 – наявний захисний бар'єр та вдув біля стінки нафтоскховища.

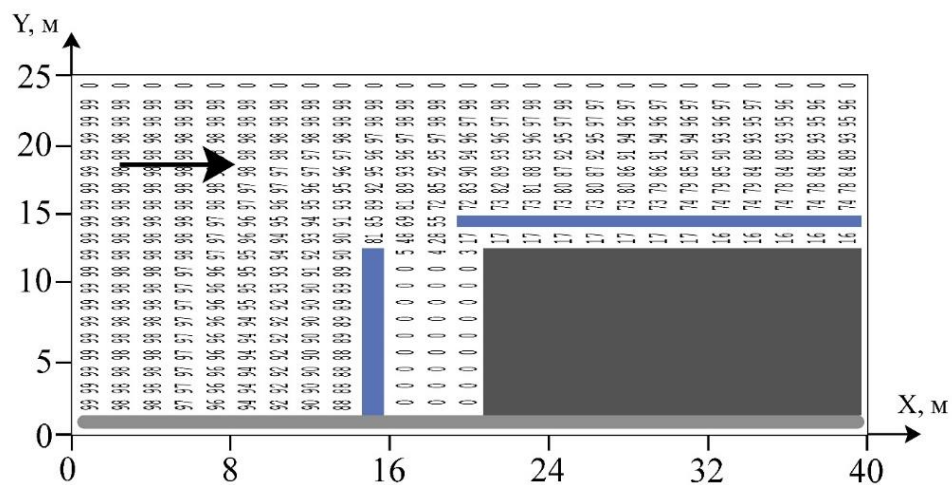


Рисунок 50 – Поле температури, $t=18$ с, сценарій № 4 – наявний захисний бар'єр, вдув біля стінки нафтоскховища та захисний екран над нафтоскховищем.

Як можна бачити з наведених рисунків, що показують прогнозне значення температури повітря на промисловому майданчику, сценарій № 4 дає можливість суттєво зменшити температуру повітря біля навітряного боку нафтосховища та над його верхньою частиною. Так, при відсутності системи захисту на промисловому майданчику температура повітря біля навітряного боку нафтосховища становить порядку 64-70 % від максимальної температури (це 1200 °C), а над його верхньою частиною знаходиться в діапазоні 77-80 %. Але для сценарію № 4 температура повітря біля навітряного боку нафтосховища становить порядку 14 % від максимальної температури (це 1200 °C), над його верхньою частиною знаходиться в діапазоні 17 %.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науковою працею, в якій вирішено важливу науково-прикладну проблему: підвищення ефективності захисту робочих зон від пилового та теплового навантаження на основі розробки та використання науково обґрунтованих засобів аеродинамічного захисту.

Наукові результати проведених досліджень полягають у наступному:

1. Здійснено аналіз засобів захисту повітря на промислових майданчиках від пилового забруднення; результати аналізу свідчать про те, що найбільш поширеним засобом захисту від пилового забруднення повітря на промислових майданчиках є використання захисних бар'єрів.

2. Аналіз літературних джерел показав, що сучасним напрямом захисту повітря від пилового забруднення є використання пористих захисних бар'єрів та бар'єрів складної геометричної форми.

3. Системний аналіз сучасних методів дослідження процесів тепломасопереносу на промислових майданчиках свідчить про те, що найбільш ефективним методом теоретичного дослідження є використання методу CFD моделювання.

4. Використання CFD моделювання для рішення конкретних прикладних задач потребує визначення комплексу фізичних параметрів, залежностей, що забезпечують «замкнутість» моделюючих рівнянь, тобто відповідність моделюючих рівнянь конкретному процесу, що досліджується; тому важливу роль грають емпіричні моделі, які дають можливість доповнити багатофакторні CFD моделі для практичного застосування.

5. Проведено комплекс експериментальних досліджень, результати якого дали можливість визначити кількість (масу) пилу, що «захоплює» крапля води при русі в забрудненому середовищі; на основі обробки експериментальних даних отримано емпіричну модель, що дає можливість науково обґрунтовано проводити CFD моделювання процесу пилопригнічення шляхом подачі води в область пилоутворення.

6. Проведено комплекс експериментальних досліджень по оцінці інтенсивності пилоутворення від забруднених ділянок промислових майданчиків при різних метеорологічних умовах; на основі обробки експериментальних даних отримано емпіричні моделі, що дають можливість

проводити науково обґрунтоване CFD моделювання процесу пилового забруднення повітря на промислових майданчиках.

7. Проведено комплекс експериментальних досліджень по аналізу аеродинаміки потоків на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів з різним ступенем перфорації; на основі обробки експериментальних даних отримано емпіричні моделі, що дають можливість проводити науково обґрунтоване CFD моделювання ефективності використання захисних бар'єрів з перфорацією на промислових майданчиках.

8. Проведено комплекс експериментальних досліджень по аналізу аеродинаміки потоків на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів складної геометричної форми; на основі обробки експериментальних даних отримано емпіричні моделі, що дають можливість проводити науково обґрунтоване CFD моделювання ефективності використання захисних бар'єрів з перфорацією на промислових майданчиках.

9. Проведено комплекс експериментальних досліджень по визначенню закономірності зміни вологості змоченої поверхні вугілля внаслідок випаровування; на основі отриманих даних експерименту побудовано емпіричну модель, яка може використовуватися для визначення часу, коли потрібно знову робити зрошування з метою мінімізації процесу пилоутворення.

10. Експериментальним шляхом визначено закономірність інтенсивності пилоутворення при різній вологості забрудненої ділянки та при різній швидкості повітряного потоку над ділянкою.

11. Розроблено CFD модель процесу випаровування води з поверхні вугілля після її зрошування; модель враховує вплив потоку повітря над областю випаровування та дає можливість визначати час, коли потрібно здійснити новий цикл зрошування забрудненої поверхні для мінімізації процесу пилоутворення.

12. Розроблено комплекс 2D та 3D CFD моделей та комп'ютерні коди для оцінки ефективності використання на промислових майданчиках захисних бар'єрів з перфорацією та захисних бар'єрів, що мають складну геометричну форму; особливістю розроблених багатофакторних CFD моделей є мінімальні витрати комп'ютерного часу на проведення обчислювального експерименту та використання типових початкових даних для реалізації моделей.

13. Розроблено чисельну модель для оцінки ефективності використання габіонів для захисту від ураження уламками дрона корпусу нафтоосховища; модель дає можливість визначати ефективність використання габіону при використанні різних речовин, що наповняють його «тіло».

14. Розроблено CFD модель для оцінки ефективності використання системи «захисний екран + вторинний вдув» для захисту нафтоосховища від теплового навантаження, що виникає внаслідок екстремальних ситуацій на промисловому майданчику; модель дає можливість визначати зміну температури біля стінок нафтоосховища з урахуванням впливу на процес теплопереносу таких параметрів, як: метеорологічні умови, геометричні розміри захисного бар'єру, температура та швидкість повітря при вдуві, наявність додаткового захисного екрану над корпусом нафтоосховища.

15. Здійснено верифікацію побудованих CFD моделей, яка підтвердила їх адекватність.

16. Результати проведених комп'ютерних експериментів на базі розроблених математичних моделей показали їх широкий робочий діапазон та здатність вирішувати складні багатофакторні задачі по оцінці ефективності різних засобів зменшення пилового та теплового забруднення на промислових майданчиках.

17. Розроблені математичні моделі та створені на їх базі комп'ютерні коди впроваджені в навчальному процесі УДУНТ та у виробничій діяльності Дніпровського відділення Філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця».

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Монографії

1. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Берлов О. В. Математичне моделювання в задачах оцінки ризику на потенційно небезпечних об'єктах: монографія. Дніпро: Журфонд, 2021. 270 с. ISBN 978-966-934-320-8.

2. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. CFD моделювання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях : монографія. Дніпро: Журфонд, 2022. 268 с. ISBN 978-966-934-348-2.

Статті у наукових фахових виданнях

3. Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Kalashnikov I. Numerical simulation of toxic chemical transport after accidental release at chemical plant. *Romanian Journal of Information Science and Technology*. 2020. Vol. 23, no. S. P. S3–S13. ISSN:1453-8245. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

4. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kozachyna V. A., Kalashnikov I. V., Shevchenko O. V. Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency burning solid propellant. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. № 1 (85). С. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200752>.

5. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A., Kalashnikov I. V. Emergency burning of solid rocket propellant: damage risk assessment to people in the workplace. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна*. 2020. № 3 (87). С. 7–15. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/208097>.

6. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельне моделювання процесу самонагрівання насипу рослинної сировини з метою визначення часу початку пожежі. *Український журнал будівництва та*

архітектури. 2021. № 6. С. 7–13. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.281221.7.809>.

7. Biliaiev M., Kozachyna V., Biliaieva V., Rusakova T., Berlov O., Mala Yu. Constructing a method for assessing the effectiveness of using protective barriers near highways to decrease the level of air pollution. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 6, No. 10 (114). P. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.249485>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

8. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Русакова Т. І. Чисельне моделювання забруднення повітря біля автошляху із захисними бар'єрами. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 2. С. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.260422.7.846>.

9. Semenenko Ye. V., Medvedieva O. O., Biliaiev M. M., Rusakova T. I., Kozachyna V. A. Mathematical model for express evaluation of process of dust air pollution in tailing facility. *Геотехнічна механіка*. 2022. Вип. 162. С. 112–125. <https://doi.org/10.15407/geotm2022.162.112>

10. Біляєв М. М., Берлов О. В., Козачина В. А., Цуркан В. В. Математичне моделювання забруднення повітря в робочому приміщенні. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2022. № 69. С. 254–262. DOI: <https://doi.org/10.33271/crpnmu/69.254>.

11. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Золотько О. В. Аналіз ефективності всмоктувальної системи для зниження рівня забруднення повітря в робочих зонах. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 5. С. 14–20. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.251022.14.886>.

12. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Berlov O., Semenenko P., Kozachyna V., Brazaluk I., Klym V., Tatarko L. Development of a method for assessing air dustiness in the main fairing of the launch vehicle. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2022. Vol. 5, No. 1 (119). P. 17–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.266013>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

13. Біляєв М. М., Берлов О. В., Козачина В. А., Ночвай В. І., Русакова Т. І. Аналіз динаміки забруднення атмосферного повітря методом чисельного моделювання. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2022. № 6. С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.271222.21.908>.

14. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Машихіна П. Б. Прогнозування радіоактивного забруднення атмосферного повітря у разі екстремальної ситуації на АЕС. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 1. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.280223.15.914>.

15. Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Тимошенко О. А., Полторацька В. М. Експрес-розрахунок забруднення робочих зон біля транспортного коридору у випадку екстремальних ситуацій на залізниці. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 2. С. 42–47. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.250423.42.929>.

16. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Математичне моделювання нестационарного процесу забруднення повітря. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 3. С. 13–19. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.140723.13.949>.

17. Біляєв М. М., Берлов О. В., Біляєва В. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Дослідження ефективності використання захисних екранів різної форми для зниження забруднення повітря. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 4. С. 27–33. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.290823.27.967>.

18. Біляєва В. В., Калашніков І. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Тимошенко О. А. Комплексне оцінювання зон забруднення за екстремальних ситуацій на енергетичних об'єктах. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2023. № 6. С. 22–28. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.261223.22.1003>.

19. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Тимошенко О. А. Зниження ризику ураження у випадку металної дії уламків. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 1. С. 56–61. DOI: <https://doi.org/10.30838/J.BPSACEA.2312.270224.56.1023>.

20. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Колесников С. О. Моделювання поширення домішки в робочому приміщенні при складній схемі вентиляції. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2024. № 6. С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.271224.48.1110>.

21. Biliaieva V., Levchenko L., Myshchenko I., Tykhenko O., Kozachyna V. Modeling the distribution of emergency release products at a nuclear power plant unit. *Advanced Information Systems*. 2024. Vol. 8, No. 2. P. 20–26. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.2.03>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

22. Біляєв М. М., Калашніков І. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Полторацька В. М. Використання габіонів для захисту від ураження нафтосховища. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 2 (106). С. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/305713>.

23. Біляєва В. В., Калашніков І. В., Берлов О. В., Губін О. І., Козачина В. А. Прогнозування наслідків надзвичайної ситуації на залізничній станції. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 3 (107). С. 15–22. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/312923>.

24. Biliaiev M. M., Biliaieva V. V., Berlov O. V., Kozachyna V. A., Mashykhina P. B. Quick computing CFD model to predict chemical pollution in room. *Наука та прогрес транспорту*. 2024. № 4 (108). С. 5–12. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2024/317406>.

25. Біляєв М. М., Берлов О. В., Козачина В. А., Машихіна П. Б., Тимошенко О. А. Дослідження впливу захисних бар'єрів на зменшення ризику виникнення захворювань у працівників. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 1. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270225.57.1129>.

26. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Семененко П. В. Прогнозування пилового забруднення повітря у вентильованому об'ємі зі складною геометрією. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 2. С. 33–40. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.33.1141>.

27. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kirichenko P. S., Kozachyna V. A., Tymoshenko L. O. Mathematical modeling of heat and mass transfer processes in safety labour problems: dust and heat pollution. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2025. № 3. С. 144–153. DOI: <https://doi.org/10.30838/UJCEA.2312.270425.144.1171>.

28. Biliaiev M., Biliaieva V., Rusakova T., Kozachyna V., Semenenko P., Berlov O., Kirichenko P., Hrudkina N., Voitenko Yu., Dolzhenkova O. Construction of a mathematical model of the heat and mass transfer process in the main fairing of a launch vehicle at the pre-launch preparation stage. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. Vol. 6, No. 1 (138). P. 71–79. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.347454>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

29. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Полторацька В. М. Математичне моделювання процесу нестационарної теплопровідності крізь стінку. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 3 (111). С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/337686>.

30. Медведєва О. О., Біляєва В. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Усенко А. Ю. Математичне моделювання забруднення повітря після вибуху в кар'єрі: експрес прогноз. *Наука та прогрес транспорту*. 2025. № 4 (112). С. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2025/345831>.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

31. Берлов О.В., Калашніков І.В., Кіріченко П.С., Козачина В.А., Русакова Т.І. Прогнозування рівня забруднення атмосфери на базі чисельної моделі. Proceedings of the XII International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» (April 30, 2019). Warsaw: RS Global, 2019. P. 41–45.

32. Біляєв М.М., Берлов О.В., Калашніков І.В., Козачина В.А., Татарко Л.Г. Оцінка територіального ризику у випадку аварійного викиду хімічно небезпечної речовини. Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference «International Trends in Science and Technology» (July 31, 2019). Warsaw: RS Global, 2019. P. 43 – 49.

33. Біляєв М.М., Козачина В.А., Біляєва В.В., Берлов О.В., Якубовська З.М. Прогнозування екологічних наслідків у випадку горіння твердого ракетного палива. Тези доповідей міжнародного наукового симпозиуму «Тиждень еколога – 2021» (18-20 жовтня 2021 р.). Кам'янське: ДДТУ, 2021. С. 57-58.

34. Біляєв М.М., Біляєва В.В., Берлов О.В., Козачина В.А., Якубовська З.М. Комп'ютерне моделювання в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на потенційно небезпечних об'єктах. Матеріали VII Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та

оптимізація складних систем» (3-5 листопада 2021 року, м. Дніпро). Дніпро: ДВНЗ УДХТУ, 2021. С. 15.

35. Біляєв М.М., Біляєва В.В., Русакова Т.І., Берлов О.В., Козачина В.А. Використання математичних моделей в задачах оцінювання наслідків екстремальних ситуацій на промислових об'єктах. Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні» (18 травня 2022 р., м. Дніпро). Дніпро: НМетАУ, 2022. С. 99-100

36. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Козачина В. А. Чисельне моделювання процесів забруднення атмосферного повітря. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (1-3 листопада 2023 року м. Дніпро). Дніпро: УДХТУ, 2023. С. 29.

37. Біляєв М.М., Берлов О.В., Калашніков І.В., Кіріченко П.С., Козачина В.А. Математичне моделювання розльоту уламків при вибуху дрону. Тези XVIII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (12-13 грудня 2024 р., Дніпро). Дніпро: УДУНТ, 2024. С. 116.

38. Біляєв М. М., Козачина В. А., Кіріченко П. С. Математичне моделювання пилового та хімічного забруднення повітря в робочих зонах. Proceedings of the 5th International Scientific and Practical Conference «New Horizons in Scientific Research: Challenges and Solutions» (Marseille, November 3-5, 2025). Marseille, 2025. P. 317-318.

39. Козачина В. А., Кіріченко П. С., Машихіна П. Б., Попов М. В. Чисельні моделі та комплекси програм для моделювання пилового забруднення повітря на промислових майданчиках. Тези XIX Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті» (Дніпро, 18-19 грудня 2025 р.). Дніпро: УДУНТ, 2025. С. 74.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

40. Khrutch V. K., Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Berlov O. V., Kirichenko P. S., Biliaieva V. V. Mathematical modeling of shock wave interaction with wagon. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 985 (2020). 012023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/985/1/012023>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

41. Voloshyn O., Biliaiev M., Biliaieva V., Kozachyna V., Berlov O., Rusakova T., Kalashnikov I. Numerical model to simulate ventilation of dead-end mine working with brattice. II International Conference Essays of Mining Science and Practice. E3S Web of Conferences. Vol. 168. article 00066 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016800066>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

42. Biliaiev M., Rusakova T., Biliaiev V., Kozachyna, V., Oladipo, M. Road with Fan for Reducing Exposure to Traffic Emissions. *Proceedings of the 25th*

International Scientific Conference «Transport Means 2021». P. 638–644. ISSN 1822-296 X. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

43. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO₂ Barrier Coating on Pollutant Dispersion Near Road. *Proceedings of the 27th International Scientific Conference «Transport Means 2023»*. P. 511–517. ISSN 1822-296 X. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

44. Biliaiev M., Biliaieva V., Berlov O., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. CFD modeling of traffic-related air pollution in street canyon. *Proceedings of 28th International scientific conference «Transport Means 2024»*. P. 120-125. DOI: <https://doi.org/10.5755/e01.2351-7034.2024.P120-125> (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

45. Biliaiev M. M., Kalashnikov I. V., Biliaieva V. V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V. Numerical simulation of pollutant dispersion from road with barrier. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2025. Vol. 1499. Art. 012057. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1499/1/012057>. (включено до міжнародної бази даних **Scopus**)

46. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Берлов О.В. Експериментальне та теоретичне моделювання процесів пилового забруднення. *Polish journal of science*. 2025. № 89. P. 40–46. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16917824>.

47. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Семененко П.В. Чисельне моделювання пилового забруднення повітря на промислових майданчиках: експрес моделювання. *Polish journal of science*. 2025. № 90. P. 31–35. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17170478>.

48. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Машихіна П.Б. Дослідження закономірностей захворюваності працівників на об'єктах гірничої промисловості та оцінювання ризику небезпеки. *Polish journal of science*. 2025. № 91. P. 53–59. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17392644>.

49. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Машихіна П.Б. Дослідження аеродинаміки потоку та інтенсивності пилоутворення при використанні напівпроникного захисного бар'єру. *Polish journal of science*. 2026. № 94 P. 71–78. <https://doi.org/10.5281/zenodo.18331081>.

50. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Берлов О.В. Моделювання процесу пилоутворення. *Slovak International Scientific Journal*. 2025. № 98. P. 12–18. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16892491>.

51. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Семененко П.В. Дослідження зміни вологості вугілля при різній швидкості повітряного потоку. *Slovak International Scientific Journal*. 2025. № 99. P. 25–30. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17118962>.

52. Біляєв М.М., Козачина В.А., Кіріченко П.С., Біляєва В.В., Попруга Д.В. Дослідження процесу «захоплення» пилу краплею води. *Slovak International Scientific Journal*. 2025. № 100. P. 3–8. <https://doi.org/10.5281/zenodo.17392477>.

АНОТАЦІЯ

Козачина В.А. Розвиток наукових основ оцінювання ефективності захисних конструкцій для захисту робочих зон від пилового та термічного забруднення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.26.01 – охорона праці. – Український державний університет науки і технологій Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми підвищення ефективності захисту робочих зон від пилового та теплового навантаження на основі розробки та використання науково обґрунтованих засобів аеродинамічного захисту.

Здійснено аналіз засобів захисту повітря на промислових майданчиках від пилового забруднення, найбільш поширеним засобом захисту від пилового забруднення повітря на промислових майданчиках є використання захисних бар'єрів (сучасний напрям – пористі захисні бар'єри та бар'єри складної геометричної форми). Найбільш ефективним методом теоретичного дослідження ефективності використання захисних бар'єрів від пилового забруднення є використання методу CFD моделювання.

Проведено комплекс експериментальних досліджень: 1) з визначення маси пилу, що «захоплює» крапля води при русі в забрудненому середовищі; 2) з оцінки інтенсивності пилоутворення від забруднених ділянок промислових майданчиків при різних метеоумовах; 3) з аналізу аеродинаміки потоків на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів з різним ступенем перфорації, складної геометричної форми; 4) з визначення закономірності зміни вологості змоченої поверхні вугілля внаслідок випаровування; 5) з визначення закономірності інтенсивності пилоутворення при різній вологості забрудненої ділянки та при різній швидкості повітряного потоку над ділянкою. На базі експериментальних досліджень побудовані емпіричні моделі.

Розроблено CFD моделі: 1) оцінки ефективності використання на промислових майданчиках захисних бар'єрів з перфорацією та захисних бар'єрів, що мають складну геометричну форму; 2) оцінки ефективності використання габіонів для захисту від ураження уламками дрона корпусу нафтосховища; 3) оцінки ефективності використання системи «захисний екран + вторинний вдув» для захисту нафтосховища від теплового навантаження.

Отримані в дисертаційній роботі результати, розроблені методи й пакети прикладних програм використовуються у виробничій діяльності Дніпровського відділення Філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця» та в навчальному процесі Українського державного університету науки і технологій.

Ключові слова: охорона праці, робоча зона, пилове забруднення, термічне забруднення, термічне ураження працівників, чисельні методи, захист робочих зон від пилового забруднення, захисні екрани, повітряна завіса, пилопригнічення.

SUMMARY

Kozachyna V. A. Development of scientific foundations for assessing the effectiveness of protective structures for protecting work areas from dust and thermal contamination – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for the scientific degree of doctor of technical sciences in specialty 05.26.01 – labour protection. – Ukrainian State University of Science and Technologies of Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

This dissertation is devoted to improving the effectiveness of protecting work areas from dust and heat loads through the development and use of scientifically sound aerodynamic protection measures.

An analysis was conducted of measures to protect the air at industrial sites from dust pollution; the most common method of protecting the air from dust pollution at industrial sites is the use of protective barriers (the current trend is toward porous protective barriers and barriers with complex geometric shapes).

This study provides a systematic analysis of scientific research methods used to solve problems in aerodynamics and heat and mass transfer related to the pollution of work areas at mining and industrial facilities. An analytical review of the literature indicates that CFD modeling is a particularly important tool for scientific research today; this method allows for the analysis of flow fields and dust concentration fields in work zones with detailed discretization of the study area.

A series of experimental studies was conducted: 1) to determine the mass of dust “captured” by a water droplet as it moves through a contaminated environment; 2) to assess the intensity of dust generation from contaminated areas of industrial sites under various weather conditions; 3) to analyze the aerodynamics of airflow at industrial sites when using protective barriers with varying degrees of perforation and complex geometric shapes; 4) to determine the patterns of changes in the moisture content of a wetted coal surface due to evaporation; 5) determining the patterns of dust generation intensity at different moisture contents of the contaminated area and at different airflow velocities over the area. Empirical models were developed based on these experimental studies.

Results obtained during experimental studies showed that perforated protective barriers and barriers with complex geometric shapes allow to reduce velocity of air flow in certain areas of industrial sites, which helps to reduce the intensity of dust formation at the industrial site.

CFD models were developed to: 1) evaluate the effectiveness of using perforated protective barriers and protective barriers with complex geometric shapes at industrial sites; 2) evaluate the effectiveness of using gabions to protect the oil storage facility’s structure from drone debris; 3) to evaluate the effectiveness of using a “protective screen + secondary air injection” system to protect an oil storage facility from thermal loads.

The developed CFD models enable to determine the patterns of dust concentration distribution in work zones at industrial sites when using perforated protective barriers and barriers with complex geometric shapes. The developed models account for the geometric shape of the protective barriers, meteorological

conditions, and dust generation intensity, which depends on the local airflow velocity at the industrial site; the results of computer simulations based on the developed models provide quick assessment of the barriers effectiveness.

The developed CFD models, so-called “operational models”, are intended for rapid assessment of the effectiveness of protective barriers and barriers with complex geometric shapes at the preliminary design stage. A distinctive advantage of the developed CFD models is the ability to perform calculations in areas with complex geometric shapes; for the practical implementation of the constructed models, standard input data is used, which is important when conducting a series of studies involving various scenarios for organizing air protection against dust pollution. The computer simulations results demonstrate that the developed CFD models represent a modern tool for carrying out complex scientific research in the field of occupational safety.

A multi-parameter mathematical model of debris movement in the air and within the “body” of a gabion has been created. Based on this mathematical model, a computer code was developed to conduct a computational experiment aimed at determining the effectiveness of protective barriers (gabions) on an industrial site.

A computational experiment was conducted, which demonstrated that the developed numerical model makes it possible to determine the optimal thickness of the gabion for various materials filling the "body" of the gabion, and also demonstrated the wide operating range of the developed numerical model.

Numerical models have been developed to solve multi-parameter problems involving the formation of thermal damage zones at industrial sites during fire, based on the numerical integration of equations of aerodynamics, heat transfer, and thermal conductivity. The proposed numerical models can be used for a preliminary assessment of the temperature field inside a protective barrier to determine its effectiveness in terms of protecting areas from thermal pollution at an industrial site.

The numerical models developed for calculating air thermal pollution at industrial sites are based on explicit formulas, which is very convenient for their coding.

An effective numerical model has been developed for analyzing shock wave propagation at an industrial site. The model can be used for rapid assessment of the risk of baric injury at an industrial site.

The results obtained in this dissertation, as well as the methods and software packages developed, are used in the operational activities of the Dnipro Branch of the “Railway Transport Design and Survey Institute” of JSC “Ukrainian Railways” and in the educational process at the Ukrainian State University of Science and Technologies.

Keywords: occupational safety, work area, dust pollution, thermal pollution, thermal injury to workers, numerical methods, protection of work areas from dust pollution, protective barriers, air curtain, dust suppression.