УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОЗАЧИНА ВІТАЛІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 628.511:519.6:001.891.5

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

05.26.01 – охорона праці
J – Транспорт та послуги

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


_____ В. А. Козачина

Науковий консультант: Біляєв Микола Миколайович, доктор технічних наук, професор

Дніпро – 2026

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 (J – Транспорт та послуги). – Український державний університет науки і технологій Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2026.

Дисертацію присвячено підвищенню ефективності захисту робочих зон від пилового та теплового навантаження на основі розробки та використання науково обґрунтованих засобів аеродинамічного захисту.

У дисертації розв’язано важливу науково-прикладну проблему: мінімізація рівня пилового та теплового забруднення на промислових майданчиках. Наукова новизна результатів, одержаних у ході вирішення даної задачі, полягає в наступному:

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 метеоумови;

– 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 метеоумови;

– розроблено математичну модель для експрес оцінювання ефективності використання габіонів для захисту об'єктів від метальної 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 нафтосховища;

одержало 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.

В дисертації виконано аналіз інформаційних матеріалів, який показав, що вугілля залишається одним із найпоширеніших джерел енергії, але видобуток вугілля, процес транспортування вугілля, розміщення вугілля на сховищах

завжди супроводжується інтенсивним пиловим забрудненням повітря. Встановлено, що вугільний пил є причиною багатьох захворювань людини, таких як астма, хронічне обструктивне захворювання легень, затримка розвитку легень, пневмоконіоз і рак легень, серцеві аритмії, гострий інфаркт міокарда тощо. Для мінімізації шкоди працівникам від вугільного пилу потрібне не тільки системне обстеження робітників, але і створення ефективних засобів зниження рівня пилового забруднення робочих зон. Проблема боротьби з пиловим забрудненням повітря в робочих зонах є пріоритетним напрямом охорони праці в гірничій промисловості.

В роботі здійснено системний аналіз методів наукового дослідження, що використовуються при рішенні задач аеродинаміки, тепломасопереносу в галузі забруднення робочих зон на об’єктах гірничо-промислового комплексу. Виявлено, що фізичний експеримент широко використовується в наукових дослідження, що проводяться для різних об’єктів гірничо-промислового комплексу та дає можливість визначати закономірності формування областей забруднення від різних джерел емісії пилу та небезпечних речовин. Але для проведення фізичного експерименту потребується значний час та кошти, що ускладнює проведення комплексних наукових досліджень.

Результати аналізу літературних джерел свідчать про те, що для рішення багатьох прикладних задач важливу роль відіграють 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.

Проведений аналітичний аналіз літератури свідчить про те, що особливо важливим інструментом наукових досліджень в теперішний час є метод CFD моделювання; метод дає можливість аналізувати поля течії, концентраційні поля пилу в робочих зонах з детальною дискретизацію області дослідження. Існують класи задач, де неможливо використовувати метод фізичного моделювання, тому метод CFD моделювання стає основним методом наукового дослідження;

важливою рисою методу CFD моделювання є значна економія часу та ресурсів при проведенні досліджень у порівнянні з методом фізичного моделювання.

Застосування комерційних кодів (наприклад, пакет ANSYS) потребує дуже висококваліфікованих працівників; комерційні пакети мають високу вартість та потребують використання потужних комп'ютерів, що не завжди наявні у користувача. Крім цього, для практичної реалізації комерційних пакетів потрібна детальна інформація про геометрію розрахункової області, про ті або інші фізичні параметри процесу, що моделюється; така інформація, на певних етапах проєктних робіт, не завжди доступна досліднику.

На основі вивчення літературних даних встановлено, що існує певний дефіцит прикладних моделей, що дозволяють комплексно вирішувати задачі захисту працівників від пилового забруднення на об'єктах гірничо-добувного комплексу, та виявлено необхідність у створенні ефективних і економічних методів чисельного дослідження процесів пилового забруднення робочих зон на об'єктах гірничо-промислового комплексу.

В роботі наведено результати комплексу експериментів по дослідженню інтенсивності пилоутворення від забрудненої вугільним пилом поверхні при різній швидкості повітряного потоку. На основі обробки результатів фізичного експерименту побудовані емпіричні моделі, що дають змогу здійснити експрес розрахунок інтенсивності емісії вугільного пилу від забруднених поверхонь.

Експериментальним шляхом:

– встановлено, що рух часток пилу по поверхні вугілля (процес «creep») починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=2.5÷2.9 м/с; рух часток пилу біля поверхні вугілля (процес «saltation») починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=3.3÷3.6 м/с; відрив часток від вугільної поверхні (процес «suspension») та дрейф часток з повітряним потоком починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=4.1÷4.5 м/с;

– визначено закономірність зміни вологості вугілля при випаровуванні: зниження вологості йде швидко протягом перших 7-8 хв; за цей проміжок часу

вологість зменшується в 2 рази при швидкості повітряного потоку 4,6 м/с та в 3 рази при швидкості повітряного потоку 7,1 м/с;

– визначено закономірність інтенсивності пилоутворення при різній вологості вугілля та різній швидкості повітряного потоку над поверхнею, що була змочена.

На основі обробки експериментальних даних отримано емпіричні моделі для експрес оцінювання зміни вологості вугілля з часом при різній швидкості повітряного потоку.

Побудовано чисельні моделі розсіювання водяної пари в повітрі при випаровуванні води зі змоченої поверхні вугілля; побудовані чисельні моделі використовують додаткову експрес модель для визначення інтенсивності масопереносу пари від змоченої поверхні вугілля. Результати комп'ютерного моделювання поширення водяної пари на промисловому майданчику показали, що запропоновано модель є ефективним сучасним інструментом дослідження складних процесі масопереносу в задачах охорони праці.

Результати експериментальних досліджень показали, що використання захисних бар'єрів з перфорацією дає можливість зменшити швидкість повітряного потоку на певних ділянках промислових майданчиків, що сприяє зменшенню інтенсивності пилоутворення на промисловому майданчику.

Експериментальним шляхом встановлено закономірності щодо розподілу приземної швидкості повітряного потоку за захисними бар'єрами різної форми; дана інформація може бути використана для обґрунтування місця розташування захисного бар'єру відносно області пилоутворення. На основі отриманих експериментальних даних побудовані емпіричні моделі, що можуть бути використані при інженерних розрахунках по визначенню раціонального місця розташування захисних бар'єрів з перфорацією.

Розроблені CFD моделі дають можливість визначати закономірності розподілу концентрації пилу в робочих зонах на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів з перфорацією; побудовані моделі враховують геометричну форму захисних бар'єрів, метеоумови, інтенсивність пилоутворення,

що залежить від величини локальної швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику; результати комп'ютерних експериментів на базі розроблених моделей дають можливість швидко визначати ефективність їх використання.

Розроблені CFD моделі відносяться до класу «operational models» та призначені для швидкого оцінювання ефективності захисних бар'єрів на етапі проєктування «фор-ескіз». Особливістю розроблених CFD моделей є можливість проведення розрахунків в областях, що мають складну геометричну форму; для практичної реалізації побудованих моделей використовуються типові вхідні дані, що є важливим при проведені комплексу досліджень, коли розглядаються різні сценарії організації захисту повітря від пилового забруднення. Результати комп'ютерних експериментів показують, що запропоновані CFD моделі представляють сучасний інструмент проведення складних наукових досліджень в галузі охорони праці.

Результати експериментальних досліджень показали, що використання захисних бар'єрів складної геометричної форми дають можливість зменшити швидкість повітряного потоку на певних ділянках промислових майданчиків, що сприяє зменшенню інтенсивності пилоутворення на промисловому майданчику.

Експериментальним шляхом встановлено закономірності розподілу приземної швидкості повітряного потоку за захисними бар'єрами складної геометричної форми. На основі отриманих експериментальних даних побудовані емпіричні моделі, що можуть бути використані при інженерних розрахунках по визначенню раціонального місця розташування захисних бар'єрів складної геометричної форми.

Розроблено CFD моделі, що дають можливість визначати закономірності розподілу концентрації пилу в робочих зонах на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів складної геометричної форми. Побудовані моделі враховують геометричну форму захисних бар'єрів, метеоумови, інтенсивність пилоутворення, що залежить від величини локальної швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику; результати комп'ютерних експериментів на

базі розроблених моделей дають можливість швидко визначати ефективність їх використання.

Створено багатопараметричну математичну модель руху уламку в повітряному середовище та в «тілі» габіону. На базі побудованої математичної моделі створено комп'ютерний код для проведення обчислювального експерименту з метою визначення ефективності використання захисних перешкод (габіонів) на території промислового майданчика.

Проведено обчислювальний експеримент, який показав, що розроблена чисельна модель дає можливість визначити раціональну товщину габіону для різних матеріалів, що заповнюють «тіло» габіону, а також показав широкий робочий діапазон розробленої чисельної моделі.

Побудовано чисельні моделі для рішення багатопараметричних задач формування областей термічного ураження на промислових майданчиках у випадку пожежі, що базуються на числовому інтегруванні рівнянь аеродинаміки, теплопередачі та теплопровідності. Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для первинної оцінки температурного поля всередині захисного бар'єру з метою визначення його ефективності з точки зору захисту областей від теплового забруднення на промисловому майданчику.

Побудовані чисельні моделі для розрахунку теплового забруднення повітря на промислових майданчиках базуються на явних формулах, що дуже зручно для їх кодування.

Розроблено ефективну чисельну модель для аналізу руху ударної хвилі на промисловому майданчику. Модель може бути використана для експрес оцінювання ризику баричного ураження на промисловому майданчику.

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.

ABSTRACT

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.

The dissertation on competition of a scientific degree of the doctor of technical sciences on a specialty 05.26.01 – occupational safety (J – Transport and services). – 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.

The dissertation solves an important scientific and applied problem: minimizing the level of dust and heat pollution at industrial sites. The scientific novelty of the results obtained in the course of solving this problem lies in the following:

– the aerodynamic patterns of flow fields when using perforated protective barriers at industrial sites have been experimentally established;

– the aerodynamic patterns of flow fields when using protective barriers with complex geometric shapes at industrial sites have been experimentally established;

– the use of protective barriers with complex geometric shapes at industrial sites to protect the air from dust pollution has been experimentally and theoretically substantiated;

– the amount of dust “captured” by a water droplet as it moves through a polluted environment has been experimentally determined;

– a set of CFD models has been developed to evaluate the effectiveness of perforated protective barriers; the models allow for the aerodynamics of flows at an industrial site, varying degrees of perforation in the protective barrier and its dimensions, dust generation intensity, and various weather conditions;

– a set of CFD models has been developed to evaluate the effectiveness of protective barriers with complex geometric shapes; the models allow for the

aerodynamics of flows at an industrial site, different barrier shapes and dimensions, dust generation intensity, and various weather conditions;

– a mathematical model has been developed for the rapid assessment of the effectiveness of gabions in protecting structures from the impact of debris generated by drone explosions;

– a numerical model has been developed for rapid assessment of the effectiveness of using the “protective barrier + secondary airflow” system to protect the hull of an oil storage facility from thermal damage;

Further developments include:

– an empirical model of the “capture” of coal dust particles by a water droplet, which allows determining the dust mass and the time required for the “capture” process;

– an empirical model for assessing the intensity of dust generation from a contaminated area, which makes it possible to quickly determine this important parameter when applying dust mass transfer models at industrial sites;

– a mathematical model of shock wave diffraction on objects, which makes it possible to perform calculations in multi-boundary regions;

– a mathematical model of water evaporation from a wetted coal surface, which, unlike existing models, allows for the consideration of the influence of airflow aerodynamics over the evaporation area on the intensity of vapor release into the air.

The dissertation includes an analysis of relevant literature, which shows that coal remains one of the most widely used energy sources; however, coal mining, transportation, and storage are always accompanied by significant airborne dust pollution. It has been established that coal dust is the cause of many human diseases, such as asthma, chronic obstructive pulmonary disease, delayed lung development, pneumoconiosis and lung cancer, cardiac arrhythmias, acute myocardial infarction, and others. To minimize the harm to workers from coal dust, it is necessary not only to conduct systematic health examinations of workers but also to develop effective measures to reduce dust pollution levels in work areas. The issue of combating airborne

dust pollution in work areas is a priority area of occupational safety in the mining industry.

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. It has been found that physical experiments are widely used in scientific research conducted for various facilities of the mining and industrial complex and make it possible to identify patterns in the formation of pollution zones from various sources of dust and hazardous substance emissions. However, conducting physical experiments requires significant time and resources, which complicates the conduct of comprehensive scientific research.

An analysis of the literature indicates that empirical models play a significant role in solving many applied problems; on the one hand, they reveal important patterns in the physical process under study, and, on the other hand, can be incorporated into the "body" of complex multifactorial numerical models, which make it possible to study the process under variations of various parameters.

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. There are classes of problems where it is impossible to use physical modeling, so CFD modeling becomes the primary method of scientific research; a key feature of CFD modeling is significant savings in time and resources when conducting research compared to physical modeling.

The use of commercial software packages (e.g., the ANSYS suite) requires highly qualified personnel; commercial packages are expensive and require powerful computers, which are not always available to the user. In addition, the practical implementation of commercial packages requires detailed information about the geometry of the computational domain and various physical parameters of the process being modeled; such information is not always available to the researcher at certain stages of the design work.

A review of the literature has revealed a certain shortage of applied models capable of comprehensively addressing the issue of protecting workers from dust pollution at mining facilities, and the need has been identified to develop effective and economical methods for the numerical analysis of dust pollution processes in work areas at mining and industrial facilities.

This paper presents the results of a series of experiments investigating the intensity of dust generation from a surface contaminated with coal dust at different airflow velocities. Based on the analysis of the physical experiment results, empirical models were developed that enable rapid calculation of the intensity of coal dust emission from contaminated surfaces.

Experimentally:

– it has been established that the movement of dust particles across the coal surface (the “creep” process) begins at an airflow velocity of approximately vs = 2.5–2.9 m/s; the movement of dust particles near the coal surface (the “saltation” process) begins at an airflow velocity of approximately vs = 3.3–3.6 m/s; the detachment of particles from the coal surface (the “suspension” process) and the drift of particles with the airflow begin at an airflow velocity of approximately vs = 4.1–4.5 m/s;

– the pattern of changes in coal moisture content during evaporation was determined: moisture content decreases rapidly during the first 7–8 minutes; during this time, moisture content decreases by a factor of 2 at an airflow velocity of 4.6 m/s and by a factor of 3 at an airflow velocity of 7.1 m/s;

– the pattern of dust formation intensity was determined for different coal moisture contents and different airflow velocities over the wetted surface.

Based on the analysis of experimental data, empirical models were obtained for the rapid estimation of changes in coal moisture content over time at different airflow velocities.

Numerical models of water vapor dispersion in air during water evaporation from a wetted coal surface were developed; these numerical models utilize an additional rapid model to determine the intensity of vapor mass transfer from the wetted coal surface. The results of computer modeling of water vapor dispersion at an industrial

site showed that the proposed model is an effective modern tool for studying complex mass transfer processes in occupational safety applications.

Results obtained during experimental studies showed that perforated protective barriers 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.

Experiments have revealed patterns in the distribution of the ground-level airflow velocity behind protective barriers of various shapes; this data can be used to determine the location of a protective barrier relative to the dust-generation area. Using the experimental data, empirical models have been developed. These models can be used in engineering calculations to determine the optimal location of perforated protective barriers.

The developed CFD models enable to determine the patterns of dust concentration distribution in work zones at industrial sites when using perforated protective barriers; 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 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.

Experimental studies results show that using protective barriers with different complex geometric shapes it is possible to reduce airflow velocity in certain areas of industrial sites, which helps to reduce the intensity of dust generation at the industrial site.

Experiments have established the patterns of ground-level airflow velocity distribution behind protective barriers with complex geometric shapes. Based on the experimental data obtained, empirical models have been developed that can be used in engineering calculations to determine the optimal placement of protective barriers with complex geometric shapes.

CFD models have been developed that make it possible to determine the patterns of dust concentration distribution in work zones at industrial sites when using protective barriers with complex geometric shapes. The constructed models account for the geometric shape of 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 make it possible to quickly determine the effectiveness of their use.

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.

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.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей та комп'ютерних кодів для рішення задач масопереносу в областях складної геометричної форми.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей та комп'ютерних кодів для рішення задач масопереносу в областях складної геометричної форми.

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***)

Особистий внесок: розробка блоку комп'ютерного коду для введення початкових даних для моделювання масопереносу в областях складної геометричної форми.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі теплового забруднення повітря, створення комп'ютерного коду.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі теплового забруднення повітря.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі на базі явної різницевої схеми

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки для визначення поля швидкості повітря в області складної геометричної форми , розробка комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки в областях складної геометричної форми при наявності бар'єрів, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз результатів моделювання.

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

Особистий внесок: розробка математичної моделі аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту в областях розташування захисних бар'єрів.

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.

Особистий внесок: розробка експрес-моделі чисельного моделювання забруднення повітря, створення комп'ютерного коду.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки, створення комп'ютерного коду.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки на базі явної різницевої схеми.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі масопереносу для моделювання процесу забруднення повітря, розробка комп'ютерного коду для проведення обчислювальних експериментів.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі масопереносу, розробка комп'ютерного коду для аналізу забруднення повітряного середовища.

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.

Особистий внесок: розробка математичної моделі та комп'ютерного коду для моделювання процесів забруднення повітря.

16. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Математичне моделювання нестаціонарного 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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки та масопереносу в області розташування бар'єрів, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювальних експериментів.

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.

Особистий внесок: проведення фізичного експерименту, розробка чисельної моделі аеродинаміки, проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка математичної моделі руху уламків у повітрі, розробка математичної моделі тепломасопереносу.

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

Особистий внесок: розробка концептуальної моделі, розробка чисельної моделі, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз результатів моделювання.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки та масопереносу в областях складної геометричної форми, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз результатів моделювання.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі масопереносу домішки в областях складної геометричної форми за наявності перешкод, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка концептуальної моделі, створення чисельної моделі польоту уламку та його взаємодії з габіоном, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз та обробка результатів моделювання

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

Особистий внесок: розробка чисельної моделі польоту уламків, розробка чисельних моделей аеродинаміки та тепломасопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювальних експериментів.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та тепломасопереносу в областях складної геометричної форми при наявності перешкод, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювальних експериментів.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для моделювання забруднення повітря та оцінювання ризику потенційної небезпеки, проведення обчислювального експерименту, аналіз результатів моделювання.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі переносу пилу в областях складної геометричної форми, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка концептуальної моделі, розробка чисельної моделі тепломасопереносу, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювальних експериментів, аналіз результатів моделювання.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі вторинного вдуву повітря для охолодження конструкції, створення комп'ютерного коду.

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

Особистий внесок: розробка комплексу математичних моделей для розв'язання теплових задач, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювальних експериментів, аналіз та обробка результатів моделювання.

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.

Особистий внесок: розробка математичної моделі пилового забруднення повітря в областях складної геометричної форми, розробка комп'ютерного коду для проведення обчислювальних експериментів.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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 симпозіуму «Тиждень еколога – 2021» (18-20 жовтня 2021 р.). Кам'янське: ДДТУ, 2021. С. 57-58.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп’ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп’ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі розльоту уламків, створення комп’ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, аналіз результатів моделювання.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі руху ударної хвилі в області розташування перешкоди, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, обробка результатів моделювання.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі масопереносу в областях складної геометричної форми та при наявності перешкод, створення комп'ютерного коду.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельної моделі для розв'язання задач аеродинаміки масопереносу в областях складної геометричної форми.

43. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO_2 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***)

Особистий внесок: розробка чисельних моделей переміщення домішки в областях складної геометричної форми, проведення обчислювального експерименту.

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***)

Особистий внесок: розробка чисельних моделей переміщення домішки в областях складної геометричної форми за наявності перешкод, створення комп'ютерного коду для проведення обчислювального експерименту.

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***)

Особистий внесок: побудова чисельної моделі переносу домішки в областях розташування бар'єрів, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі масопереносу завислої домішки, створення комп'ютерного коду.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі аеродинаміки, розробка комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту по моделюванню забруднення повітря на промислових майданчиках.

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.

Особистий внесок: розробка чисельної моделі переносу завислої домішки в повітряному середовищі, створення комп'ютерного коду, проведення обчислювального експерименту, обробка результатів моделювання.

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.

Особистий внесок: постановка та проведення фізичного експерименту, обробка та аналіз результатів експерименту, побудова емпіричної моделі.

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.

Особистий внесок: постановка та проведення фізичного експерименту, обробка та аналіз результатів експерименту, розробка чисельної моделі масопереносу, створення комп'ютерного коду.

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.

Особистий внесок: постановка та проведення фізичного експерименту, обробка та аналіз результатів експерименту, побудова емпіричної моделі.

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.

Особистий внесок: постановка та проведення фізичного експерименту, обробка та аналіз результатів експерименту, побудова емпіричної моделі.

ЗМІСТ

ВСТУП 32
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ 40
1.1 Пилове забруднення: класифікація, характеристики 40
1.2 Вплив пилового забруднення на працівників 43
1.3 Засоби захисту робочих зон від пилового забруднення 56
Висновки до розділу 1 65
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ ГІРНИЧО-ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ 67
2.1 Аналіз наукових досліджень по проблемі пилового забруднення повітря 67
2.2 Експериментальні методи дослідження 72
2.3 Метод математичного моделювання 79
2.4 CFD моделювання 98
2.5 Моделі оцінювання ризику захворювання працівників 108
Висновки до розділу 2 110
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПИЛОУТВОРЕННЯ ТА ЗАХОПЛЕННЯ КРАПЛЯМИ ВОДИ ЧАСТОК ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ 113
3.1 Опис експериментального обладнання 113
3.2 Дослідження інтенсивності пилоутворення вугільного пилу 117
3.3 Дослідження зміни вологості вугілля при різній швидкості повітряного потоку 121
3.4 Визначення інтенсивності інфільтрації води у вугільну масу 125
3.5 Визначення інтенсивності випаровування води зі змочуваної поверхні вугілля 130
3.6 Чисельна модель розсіювання водяної пари 136
3.7 Визначення швидкості гравітаційного осадження часток пилу 145
3.8 Визначення маси пилу, що захоплюється рухомою краплею води 146
3.9 Математичне моделювання процесу зменшення пилового забруднення повітря шляхом подачі води в пилову хмару 151
Висновки до розділу 3 158
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНИХ БАР'ЄРІВ З ПЕРФОРАЦІЄЮ 160
4.1 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні повністю перфорованих бар'єрів 160

4.2 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні частково перфорованих бар'єрів 175
4.3 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні частково перфорованих бар'єрів складної форми 185
Висновки до розділу 4 196
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНОГО БАР'ЄРУ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ 198
5.1 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні бар'єру, що має криволінійну форму 198
5.2 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні бар'єру, що має додатковий елемент типу «шафа» 214
5.3 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні бар'єру, що має додатковий елемент типу «сходинка» 244
Висновки до розділу 5 267
РОЗДІЛ 6 ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ НЕБЕЗПЕКИ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ ПРИ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЯХ 269
6.1 Чисельна модель розльоту уламків при вибухі дрону 270
6.2 Моделювання теплового забруднення повітря на промислових майданчиках 280
6.3 Моделювання захисту резервуара з нафтою від теплової хвилі 296
6.4 Моделювання процесу дифракції ударної хвилі після вибуху 305
Висновки до розділу 6 312
ВИСНОВКИ 314
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 318
ДОДАТОК А ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ 338
ДОДАТОК Б СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ 340

ВСТУП

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-XII 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-різницевих 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 метальної 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 нафтосховища.

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 багатофакторних 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, 4, 7, 10-17, 19, 20, 22, 25-30, 35, 43, 44, 63, 64, 66, 67, 71, 73, 74, 126, 136];

– розроблено чисельні моделі аеродинаміки в областях складної геометричної форми [1, 3, 5-7, 10, 14, 16, 17, 19, 20, 25, 26, 33, 35, 43, 67, 69, 72, 73, 126];

– розроблено чисельні моделі теплопереносу, здійснено розробку чисельних моделей для аналізу впливу вдуву повітря на тепловий режим [2, 18, 36, 62, 64, 65, 67, 70];

– розроблено чисельні моделі руху уламку та його взаємодії з перешкодами [8, 23, 24, 35, 36];

– розроблено чисельну модель взаємодії ударної хвилі з перешкодами [107];

– розроблено комп'ютерні коди для реалізації чисельних моделей [1, 3-5, 7, 8, 10-16, 18-20, 22-30, 33-35, 43, 64-68, 70-72, 74, 107, 126, 136];

– проведено обчислювальні експерименти на базі розроблених моделей, виконав аналіз та обробку результатів дослідження [5, 6, 8, 10, 14, 18, 23, 24, 30, 33, 63, 67, 71, 107];

– проведено фізичні експерименти, виконано аналіз та обробку результатів дослідження [6, 28, 29, 31, 32].

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 симпозіумі «Тиждень еколога – 2021» (Кам'янське, жовтень, 2021 р.); VII Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, листопад, 2021 р.); 25th International scientific conference TRANSPORT MEANS 2021 (Kaunas, Lithuania, October, 2021); Тринадцятій міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ІТММ'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 р.); 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 р.).

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.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ

1.1 Пилове забруднення: класифікація, характеристики

Рівень вмісту твердих зважених частинок (PM – particulate matter) у атмосферному повітрі є ключовим показником для кількісної оцінки забруднення повітря, а їхня концентрація визначає якість повітря в навколишньому середовищі або на робочому місці [135]. Природні PM – це складна, гетерогенна суміш твердих або рідких частинок різного розміру, що виділяються з різних джерел. До природних джерел PM у навколишньому середовищі належать, зокрема, пил, що утворюється внаслідок вулканічної діяльності, пустельний пил, морська сіль, лісові пожежі, пилок та інші біологічні речовини. Штучні PM утворюються в результаті діяльності людини (антропогенні), включаючи часткове спалювання викопного палива (вугілля, дизельне паливо, дрова), гірничодобувну діяльність, будівництво, вихлопи промислових підприємств та транспортних засобів, а також сільськогосподарську діяльність.

PM у повітрі існують у широкому діапазоні розмірів і часто характеризуються на основі їх аеродинамічного розміру та здатності проникати в дихальні шляхи та легені. PM класифікуються як інгаляційні PM та респіраторні PM. За визначенням, частинки з 50-відсотковим пороговим аеродинамічним діаметром $\leqslant$10 мкм (PM_{10}) класифікуються як інгаляційні PM, які можуть проникати в дихальні шляхи при вдиханні та вважаються біологічно важливими. Ці грубі частинки потрапляють у верхні дихальні шляхи і можуть осідати в трахеобронхіальній ділянці шляхом ущільнення, спричиняючи ушкодження дихальних шляхів та верхньої частини грудної клітки. З огляду на їх шкідливий характер, концентрація зважених частинок PM_{10} є основним

об’єктом уваги стандартів якості повітря ВООЗ та регуляторних органів, які здійснюють моніторинг якості повітря в населених пунктах та на робочих місцях. Дрібні та ультрадрібні частинки, діаметр яких не перевищує 2,5 мкм (тобто $PM_{2,5}$ та $PM_{0,1}$), називаються респіраторними (вдихуваними) частинками. Їхній аеродинамічний розмір дозволяє частинкам оминати первинні захисні механізми верхніх дихальних шляхів і проникати глибоко в нижні дихальні шляхи та паренхіму легень через процеси осідання та дифузії, де самі PM або пов’язані з ними хімічні забруднювачі можуть взаємодіяти з процесами в легенях і спричиняти дисфункцію або захворювання.

Забруднення повітря, спричинене частинками $PM_{2,5}$, є п’ятою за значимістю причиною смертності, із загалом 103,1 млн років життя, скоригованих на непрацездатність (DALYs – disability-adjusted life years), які, згідно з даними ВООЗ, відображають загальний час, втрачений через передчасну смерть та через погіршення стану здоров’я або інвалідність. Частинки пилу розміром від 0,5 мкм до 20 мкм, що вдихаються, можуть проникати нижче гортані та спричиняти легеневі та серцево-судинні ускладнення у різних вікових групах або посилювати вже існуючі захворювання, такі як астма або ХОЗЛ. Крім того, література свідчить про тісний зв'язок між рівнем експозиції до PM та підвищеною смертністю від серцево-судинних захворювань та раку легень. Дослідження з використанням експериментальних моделей вказують на те, що вдихання PM має значний потенціал до утворення реактивних форм кисню (ROS) та реактивних форм азоту (RNS), які спричиняють окислювальне пошкодження ДНК та підвищують ризик серцево-судинних захворювань та раку легень.

Унікальні властивості різних типів PM, такі як малий розмір, велика площа поверхні та поверхневий заряд (електростатичний, гідрофобний), дозволяють їм легко притягувати та утримувати навколишні хімічні та металеві забруднювачі. Крім того, їх аеродинамічний діаметр та низька щільність дозволяють PM та їх комплексам тривалий час залишатися в повітрі, переноситися повітряними потоками та переміщатися на значні відстані від джерела забруднення. Їхня

здатність утримувати забруднювачі навколишнього середовища або робочого місця дозволяє їм виступати потенційними носіями токсичних або канцерогенних речовин, таких як поліароматичні вуглеводні (ПАВ) та пер- і поліфторалкільні сполуки, у дихальні шляхи та легені людини. Потрапивши в легені, частинки та їхні забруднювачі можуть викликати патологічні процеси, що призводить до патофізіологічних змін, які порушують нормальну функцію легень та викликають гострі та хронічні респіраторні та серцево-судинні захворювання [135].

З огляду на токсичний потенціал, ВООЗ встановила діючі глобальні норми для PM_{10} та $PM_{2,5}$ у атмосферному повітрі на рівні 45 мкг/м³ та 15 мкг/м³ за середньодобовим значенням, а також 15 мкг/м³ та 5 мкг/м³ за середньорічним значенням відповідно (рис. 1.1) [140].

Pollutant	Averaging time	Interim target				AQG level
		1	2	3	4	
$PM_{2.5}$, µg/m³	Annual	35	25	15	10	5
	24-hour[a]	75	50	37.5	25	15
PM_{10}, µg/m³	Annual	70	50	30	20	15
	24-hour[a]	150	100	75	50	45
O_3, µg/m³	Peak season[b]	100	70	–	–	60
	8-hour[a]	160	120	–	–	100
NO_2, µg/m³	Annual	40	30	20	–	10
	24-hour[a]	120	50	–	–	25
SO_2, µg/m³	24-hour[a]	125	50	–	–	40
CO, mg/m³	24-hour[a]	7	–	–	–	4

[a] 99th percentile (i.e. 3–4 exceedance days per year).
[b] Average of daily maximum 8-hour mean O_3 concentration in the six consecutive months with the highest six-month running-average O_3 concentration.

Рисунок 1.1 – Рекомендовані рівні якості повітря відповідно до ВООЗ.

Однак ці міжнародні стандарти базуються на даних про розподіл населення та стан здоров’я, отриманих у розвинених країнах, і не враховують відмінності у хімічному складі та джерелах забруднення, а також не відображають рівень PM у перенаселених країнах, що розвиваються.

Директива 2008/50/ЄС — це ключовий документ ЄС про якість повітря, впровадження якого є зобов'язанням України відповідно до підписаної Угоди про асоціацію. Вона встановлює граничні концентрації забруднювачів (SO_2, NO_2, PM, свинець, бензол). Відповідно до даної директиви, середньодобова та середньорічна гранична концентрація PM_{10} складає відповідно 50 мкг/м³ та 40 мкг/м³.

1.2 Вплив пилового забруднення на працівників

Швидкий розвиток науки і техніки став синонімом підвищення рівня життя у багатьох регіонах світу, а це підвищення рівня життя супроводжувалося зростанням споживання енергії. Що стосується енергетики, не зважаючи на те, що відсоток вугілля у виробництві електроенергії дещо зменшився (рис. 1.2) – у 1985 р. він складав 37,92 %, у 2025 р. – 34,08 %, вугілля залишається одним із найпоширеніших джерел енергії, особливо для країн, що розвиваються, де вугілля є основним джерелом енергії: Ботсвана – 95,75 %, Косово – 93,32 %, Монголія – 86,16 %, Південна Африка – 83,03 %, Індія – 74,77 % (https://ourworldindata.org/).

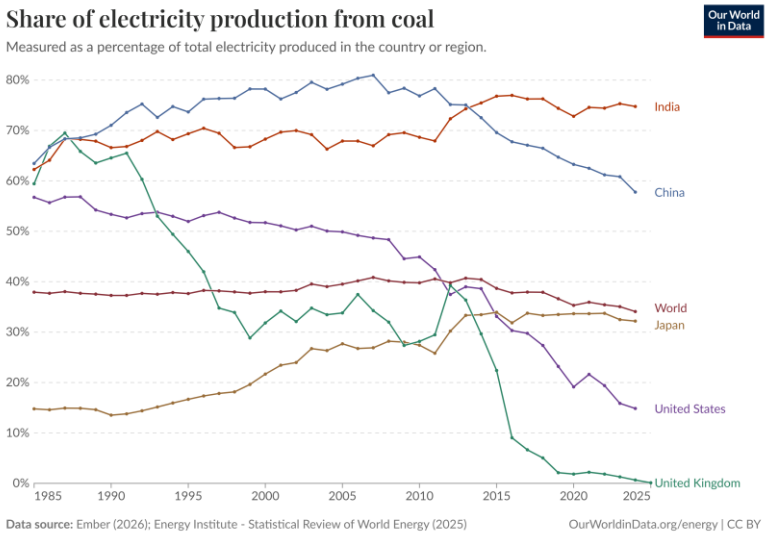


Рисунок 1.2 – Частка виробництва електроенергії з вугілля (https://ourworldindata.org/).

Щоб задовольнити постійно зростаючий попит, інтенсивність видобутку вугілля щороку збільшується (рис. 1.3). Наразі відкритий та підземний видобуток є основними способами видобутку вугілля. Вибір способу видобутку в основному залежить від глибини залягання вугільних пластів, щільності та тиску верхніх пластів, а також від товщини вугільних пластів. Незалежно від того, який метод застосовується, видобуток вугілля завжди пов'язаний, з одного боку, із забрудненням навколишнього середовища, а з іншого, – із численними проблемами для здоров'я.

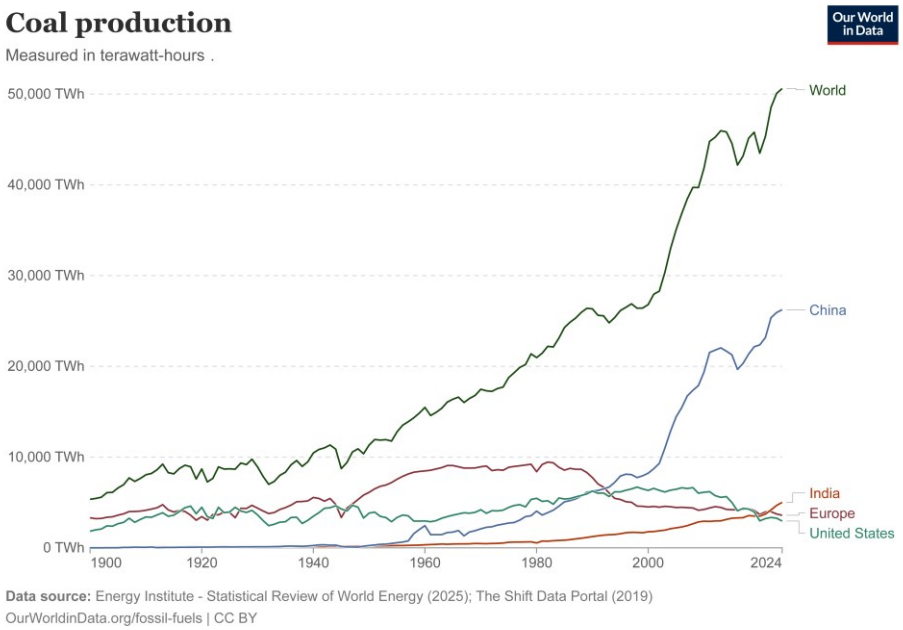


Рисунок 1.3 – Динаміка видобутку вугілля у ТВт·год.

Однією з важливих проблем, пов'язаних із видобутком вугілля, є вугільний пил, який може спричинити низку проблем зі здоров'ям. Майже усі процеси видобутку, такі як розрізування, транспортування та збагачення вугілля, супроводжуються постійним утворенням вугільного пилу.

Вугільний пил — це тверді частинки вугілля, розмір яких не перевищує 100 мікрон і які легко переносяться вітром. Розмір частинок напряму впливає на їх негативну здатність до спричинення проблем зі здоров'ям: найнебезпечнішими є дрібні частинки розміром менше 10 мікрон, оскільки вони можуть проникати глибоко в легені людини, а деякі можуть навіть потрапляти в кровотік. Таким

чином, вплив таких частинок може позначатися як на легенях, так і на серці, та становить значний ризик для здоров'я людини.

Вважається, що вугільний пил є причиною багатьох захворювань людини, таких як астма, хронічне обструктивне захворювання легень, затримка розвитку легень, пневмоконіоз і рак легень, серцеві аритмії, гострий інфаркт міокарда тощо (рис. 1.4). Для шахтарів-вугільників найпоширенішим і найсерйознішим захворюванням є пневмоконіоз.

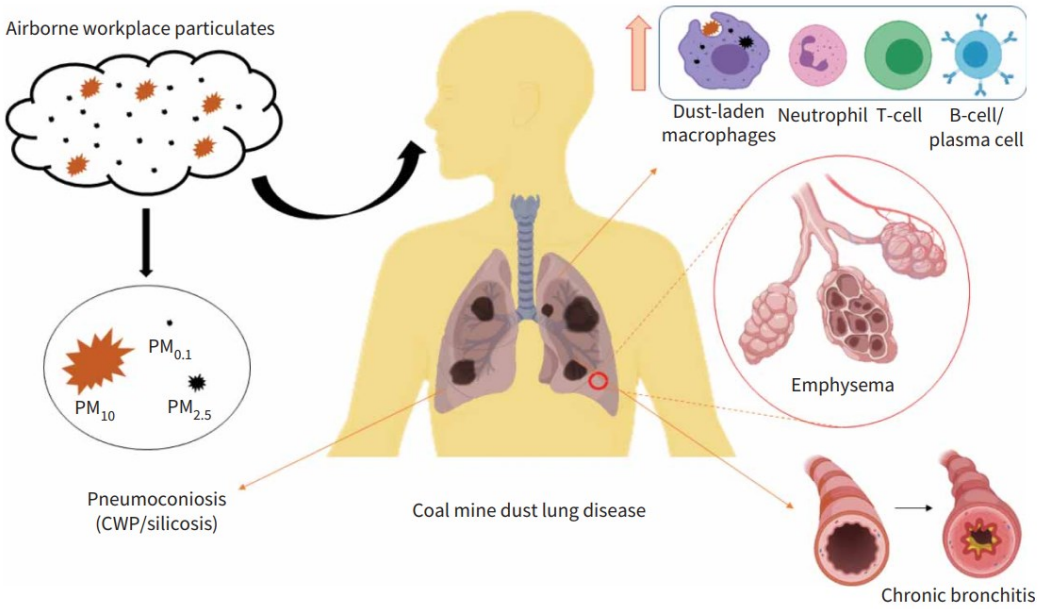


Рисунок 1.4 –Професійні захворювання легень, пов’язаних із вдиханням пилових частинок (PM) [135].

Силікоз – це невиліковне і часто смертельне захворювання легенів, є найпоширенішим серед пневмоконіозів, пов’язаних із надмірним впливом вдихання кристалічного кремнезему в гірничодобувній промисловості (рис. 1.5). Три найпоширеніші форми вдихуваного кристалічного кремнезему – це кварц, тридиміт і кристобаліт. Кварц – поширений мінерал у земній корі, і багато гірничих робіт пов’язані з прямим контактом із розкривними породами та рудою, що містять кварц. Отже, працівники у більшості галузей гірничої промисловості потенційно піддаються впливу кристалічного кремнезему розміром, придатним

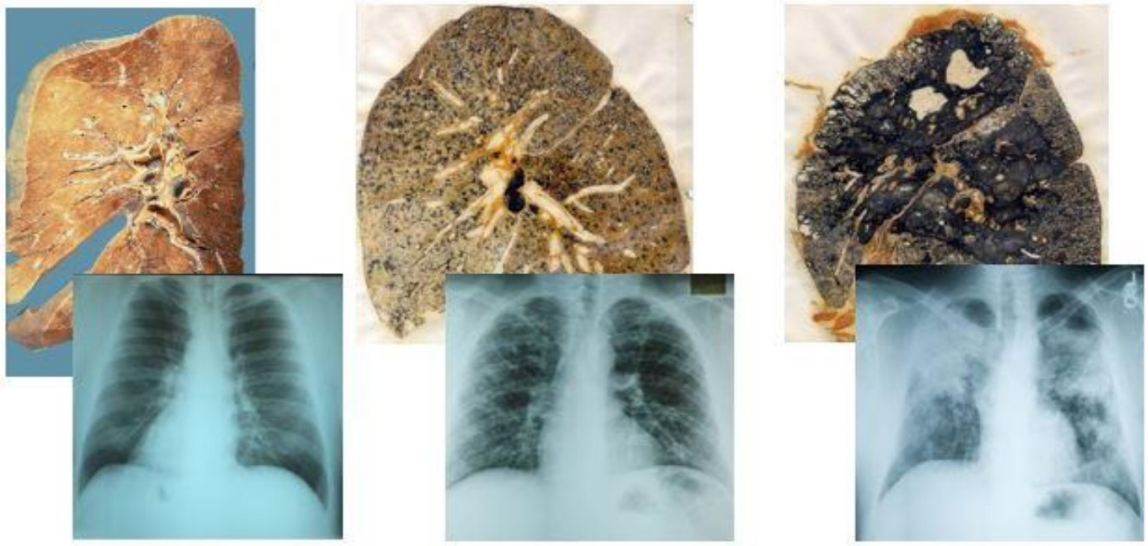
для вдихання, під час рутинних гірничих робіт, таких як буріння, підривання, дроблення, сортування, транспортування та завантаження.



а) б)

Рисунок 1.5 – Фото легень (ліофізовані) [116]: а – здорові легені; б – легені, вражені силікозом.

Залежно від концентрації кристалічного кремнезему, що потрапляє в дихальні шляхи, та тривалості впливу, у працівників може розвинутися будь-яка з трьох форм силікозу – хронічна, прискорена, гостра (рис. 1.6).



а) б) в)

Рисунок 1.6 – Фото легень з різними формами силікозу:
а – хронічна; б – прискорена; в – гостра.

Не у всіх працівників, у яких діагностовано силікоз, спостерігаються симптоми; у деяких хворих на хронічну форму захворювання не буде помітних симптомів, незважаючи на характерні відхилення на рентгенограмі грудної клітки.

Однак у багатьох працівників із хронічним силікозом симптоми з'являються з часом, а практично всі хворі на прискорену та гостру форми захворювання мають симптоми ще до того, як їм буде поставлено діагноз.

1.2.1 Класифікація захворювань легень

Обструктивні захворювання легень (OLD – **Obstructive lung diseases**) та рестриктивні захворювання легень (RLD – R**estrictive lung diseases**) – це дві різні категорії респіраторних розладів з різними патофізіологічними характеристиками, клінічними проявами та підходами до лікування. Основна відмінність між OLD та RLD полягає в характері обмеження повітряного потоку та першопричинах захворювань. Обструктивні захворювання легень, такі як хронічне обструктивне захворювання легень (COPD – chronic obstructive pulmonary disease), астма та бронхоектази, характеризуються обмеженням повітряного потоку під час видиху через звуження дихальних шляхів, як зазначено у звіті Глобальної ініціативи з хронічних обструктивних захворювань легень (GOLD – Global Initiative for Chronic Obstructive Lung Disease). На противагу цьому, рестриктивні захворювання легень, включаючи легеневий фіброз, саркоїдоз і пневмоконіоз, обмежують розширення легень і зменшують загальну ємність легень.

Деякі ключові характеристики обструктивних захворювань легень включають:

1) обмеження повітряного потоку під час видиху;

2) звуження дихальних шляхів;

3) збільшення залишкового об'єму;

4) зниження співвідношення FEV1/FVC на тестах легеневої функції (FEV1 – First Second of Forced Expiration – Форсований видих за першу секунду, FVC – Forced Vital Capacity Expiratory – Форсована життєва ємність легенів);

5) симптоми, такі як хрипи, кашель та задишка, як описано у звіті GOLD.

Лікування обструктивних захворювань легень часто включає бронходилататори, препарати тривалої дії та інгаляційні кортикостероїди.

З іншого боку, рестриктивні захворювання легень характеризуються:

1) обмеженим розширенням легень;

2) зменшенням загальної ємності легень;

3) зниженням легеневих об'ємів (TLC – Total Lung Capacity – Загальна ємність легень, FVC, FEV1);

4) нормальне або підвищене співвідношення FEV1/FVC.

5) такі симптоми, як прискорене, поверхневе дихання та задишка.

Лікування рестриктивних захворювань легень спрямоване на першопричину і може включати протизапальні препарати, антифібротичні засоби та додатковий кисень.

Важливо зазначити, що деякі пацієнти можуть мати як обструктивні, так і рестриктивні захворювання легень, що може ускладнити діагностику та лікування. У таких випадках всебічна оцінка функціональних порушень і ретельний розгляд основних причин мають вирішальне значення для ефективного лікування. Фундаментальна різниця між обструктивними та рестриктивними захворюваннями легень полягає в тому, що обструктивні захворювання в першу чергу впливають на потік повітря через дихальні шляхи, тоді як рестриктивні захворювання обмежують здатність легень або грудної стінки до розширення.

1.2.2 Захворювання легень, обумовлені вдиханням пилу

Вдихання пилу, що утворюється при видобутку вугілля, може призвести до розвитку вугільного пилового захворювання легень (CMDLD – coal mine dust lung disease). Окрім класичного пневмоконіозу вугільників (CWP – coal workers' pneumoconiosis) та його важкої і потенційно смертельної форми, ускладненого або прогресуючого масивного фіброзу (PMF – progressive massive fibrosis), CMDLD також включає змішаний пиловий пневмоконіоз із супутнім впливом діоксиду кремнію, хронічний бронхіт, емфізему та пов'язаний з пилом дифузний

фіброз, хронічне обструктивне захворювання легень (COPD – chronic obstructive pulmonary disease) (табл. 1.1). Крім того, вплив пилу може негативно впливати на функцію легень шахтарів за аналогією з ХОЗЛ, особливо на тих, хто коли-небудь палить. Таким чином, шахтарі належать до групи високого ризику з респіраторної захворюваності та передчасної смерті. З огляду на масштаби видобутку вугілля в усьому світі, респіраторне здоров'я шахтарів залишається важливою проблемою в усьому світі.

Таблиця 1.1 – Спектр CMDLD

Робота легень	Діагноз
Нормальна в більшості випадків	Антракоз Хронічний бронхіт Синдром Каплана (ревматоїдний пневмоконіоз)
Рестриктивна	CWP - звичайна CWP - швидко прогресуюча CWP - PMF
Обструктивна	COPD
Змішана	Рестриктивна CMDLD з COPD

1.2.3 CWP: тенденції та розповсюдження

Країни з високим рівнем доходу

У відповідь на неприйнятну ситуацію щодо легеневих захворювань серед шахтарів у 1969 році Федеральний закон США про охорону здоров'я та безпеку праці у вугільних шахтах (Federal Coal Mine Health and Safety Act, FCMHSA) встановив законодавчі рекомендації щодо гранично допустимих рівнів впливу пилу для підземних і наземних шахт. За наказом FCMHSA Національний інститут охорони праці та здоров'я (NIOSH) впровадив Програму нагляду за здоров'ям працівників вугільної промисловості (CWHSP) для моніторингу

зниження рівня захворюваності, що в тому числі було результатом нових правил контролю за пилом. У Сполучених Штатах це втручання громадської охорони здоров'я ефективно знизило поширеність CWP серед підземних шахтарів з 11,2% у 1970-1974 роках до 2,0% у 1995-1999 роках, а також зменшило смертність з більш ніж 15 до менш ніж 5 смертей на мільйон. Однак, починаючи з 2000 року, спостерігається зростання кількості діагнозів CWP у підземних шахтарів, навіть у тих, кому менше 50 років, які мали б пропрацювати всю свою трудову діяльність відповідно до сучасних правил контролю за пилом, встановлених FCMHSA. Це нещодавнє зростання поширеності частково пояснюється підвищенням рівня забруднення шахтним пилом, збільшенням тривалості робочого дня, особливо на вибої, підвищеним впливом кристалічного діоксиду кремнію та зайнятістю на менших за розміром шахтах. Прогресивна механізація з використанням новітніх технологій гірничого обладнання призвела до того, що менше шахтарів виробляють більше пилу, придатного для вдихання.

На відміну від нагляду за підземними шахтарями в США, FCMHSA не визначив періодичного нагляду за станом здоров'я шахтарів, які працюють на відкритих шахтах. Порівняльні дані про поширеність захворювання були відсутні, доки в 2010-2011 роках не було проаналізовано серію рентгенограм грудної клітки шахтарів, які працювали на відкритих гірничих роботах. З 2257 шахтарів зі стажем роботи на відкритих гірничих роботах не менше 1 року у 2,0% (*n*=46) було виявлено CWP, а у 0,5% (*n*=12) – PMF, причому більшість з них ніколи не працювали під землею і походили з центральної частини Аппалачів, південної частини Західної Вірджинії, східного Кентуккі і західної Вірджинії. Таким чином, епіднагляд також важливий для цієї підгрупи шахтарів.

В Австралії протягом минулого століття спостерігалося схоже і різке зниження смертності від пневмоконіозу, яке з 1970 року стабілізувалося на рівні близько п'яти смертей на мільйон. У 2006-2007 роках 16% госпіталізацій, пов'язаних з пневмоконіозом, були пов'язані з CWP (n=34), що могло бути пов'язано із хронічною хворобою. На відміну від Сполучених Штатів, смертність від CWP в Австралії була незначною з 1970-х років. Однак нещодавно у шахтарів

вугільної промисловості Квінсленду, де видобувається більшість високоякісного металургійного (коксівного або чорного) вугілля в Австралії, несподівано діагностували CWP як у підземних, так і у відкритих шахтах. Ці події підняли два питання. По-перше, рекомендовані рівні пилу, що вдихається, відрізняються в різних штатах Австралії (2,5 мг/м^3 для Нового Південного Уельсу проти 3 мг/м^3 для Квінсленду) порівняно з 2 мг/м^3 у США, які були знижені до 1,5 мг/м^3 з 1 липня 2016 року. По-друге, виникли сумніви щодо ефективності сучасних технічних засобів боротьби з пилом на шахтах для запобігання надмірному впливу пилу на шахтарів, який вони вдихають. Ані продуктивність, ані ефективність цих засобів контролю пилу не були в центрі уваги глобальних регуляторних вимог, незважаючи на значне зростання світового видобутку корисних копалин у всіх формах гірничодобувної промисловості.

Країни з низьким та середнім рівнем доходу

У Китаї CWP є основним професійним захворюванням легень і становить понад половину всіх нових діагнозів пневмоконіозу. Це дорівнювало 13955 новим діагнозам у 2013 році. У систематичному аналізі 11 китайських звітів, опублікованих між 2001 і 2011 роками, загальна поширеність CWP була оцінена на рівні 6,0% на основі даних про 10821 особу з діагнозом CWP із 173646 китайських робітників, які зазнали впливу пилу. Цей показник був відносно вищим на місцевих шахтах порівняно з державними шахтами і приблизно відповідає показникам поширеності у 3,2% у США та 0,8% у Великобританії за аналогічний період часу.

Хоча CWP є серйозною проблемою для здоров'я в інших країнах Азійсько-Тихоокеанського регіону, існує лише кілька досліджень, які описують масштаби цієї проблеми. Майже 20 років тому був опублікований всебічний звіт з В'єтнаму, в якому описувалися дуже високі показники пневмоконіозу, отримані в результаті «спеціальних польових досліджень», проведених урядом В'єтнаму. Це контрастувало з офіційною статистикою щодо силікозу від Національного інституту охорони праці (NILP), який визнав, що ці цифри є заниженою оцінкою справжньої частоти захворювання. Оскільки шахтарям з респіраторними

симптомами зазвичай виділяли кошти на рентгенографію грудної клітки, багато шахтарів з безсимптомним перебігом захворювання не були виявлені, незважаючи на потенційну користь від раннього втручання. На той час традиційна ручна праця була переважаючою технологією видобутку корисних копалин, проте, як повідомлялося, концентрація пилу в повітрі на одній з підземних вугільних шахт у понад 30 разів перевищувала національні стандарти. Концентрація діоксиду кремнію у відкритих розробках становила від 12% до 28%, тому постраждалі особи могли мати змішаний пиловий пневмоконіоз, який зараз офіційно визнаний у спектрі CMDLD.

За оцінками дослідження «Глобальний тягар хвороб» (Global Burden of Disease, GBD), стандартизований за віком показник смертності на 100000 осіб зменшився вдвічі з 0,8 у 1990 р. до 0,4 у 2013 р., переважно для країн з низьким і середнім рівнем доходу. Однак ці дані про смертність були зібрані в два моменти часу і, можливо, не зазнали суттєвого впливу нещодавньої тенденції до зростання поширеності CWP.

1.2.4 Особливості CWP

Патологічні особливості CWP

Накопичення вугільного пилу в легеневій тканині призводить до різноманітних патологічних змін – від нешкідливого антракозу дихальних шляхів до незворотного фіброзу легень та емфіземи. Вугільний пил накопичується в кінцевому бронхосудинному пучку і поглинається альвеолярними та інтерстиціальними макрофагами, що призводить до утворення легеневих макул і вузликів з відкладенням щільних колагенових волокон. Також можуть спостерігатися вогнищеві емфізематозні зміни навколо стінок дихальних бронхіол. Стимульоване вивільнення прозапальних цитокінів, включаючи TNF - α, є потенційним біомаркером легеневої патології, а вміст заліза у вугільному пилу може відображати ступінь впливу і бути маркером окислювального ураження легень.

Клінічні особливості CWP

Респіраторні симптоми CWP є неспецифічними і здебільшого перетинаються з іншими захворюваннями, пов'язаними з вугільним пилом, такими як хронічний бронхіт, COPD та емфізема. Чорно-пігментоване мокротиння (меланоптизм) може з'являтися, коли великі вузлики некротизуються і розріджуються в дихальних шляхах. Порушення функції легень включають хронічну обструкцію повітряного потоку, істинне звуження легень, змішані дефекти вентиляції та зниження дифузійної здатності окису вуглецю, які можуть варіювати залежно від вмісту вдихуваного діоксиду кремнію, стадії захворювання та ступеня впливу тютюнового диму. Навіть за наявності рентгенологічно підтвердженого пневмоконіозу, обструкція повітряного потоку відіграє основну роль у виникненні задишки у працівників вугільної промисловості. Шахтарі часто піддаються впливу сигаретного диму, дизельних вихлопів і біоаерозолів, і це може ускладнити визначення ролі вугільного пилу в розвитку COPD у шахтарів. Нещодавно Kuempel та ін. продемонстрували, що вплив вугільного пилу пов'язаний з підвищеним ризиком розвитку емфіземи порівняно з курінням сигарет, дослідивши 722 розтини трупів загиблих від CWP. Крім того, вплив вугільного пилу є предиктором смертності від хронічного бронхіту та емфіземи навіть у тих, хто не палить.

Комп’ютерна томограма високої роздільної здатності (HRCT – High-Resolution Computed Tomography) грудної клітки слід проводити працівникам вугільних шахт, які мають або пограничні інтерстиціальні зміни на звичайних рентгенограмах, або у яких необхідно розглянути інші діагнози, такі як новоутворення, васкуліт, гіперчутливий пневмоніт або мікобактеріальну інфекцію. Відкрита біопсія легень або бронхоскопія зазвичай не є необхідними у пацієнтів зі значним опроміненням і типовою візуалізацією.

Для оцінки фізичних обмежень пацієнта та впливу захворювання легень можна використовувати серцево-легеневе тестування з фізичним навантаженням. У пацієнтів з CWP високий вентиляційний еквівалент кисню (що свідчить про невідповідність між вентиляцією та перфузією) є найкращим

предиктором тяжкості задишки порівняно з іншими функціональними показниками. Припускають, що раннє і прискорене зниження FEV_1 тісніше пов'язане із захворюваннями дрібних дихальних шляхів, ніж з емфіземою або фіброзним захворюванням легень. Цікаво, що нещодавно опубліковані результати в ширшій популяції хворих на COPD легкого та середнього ступеня тяжкості з функціональною оцінкою дрібних дихальних шляхів за допомогою методу комп'ютерної томографії (КТ) на видиху та вдиху виявилися узгодженими. Раннє розпізнавання захворювань дрібних дихальних шляхів може бути корисним для виявлення працівників з ризиком розвитку COPD; ці спостереження повинні бути відтворені на більшій когорті з детальною функціональною та рентгенологічною оцінкою дрібних дихальних шляхів.

Тяжкий легеневий фіброз, пов'язаний зі значним порушенням газообміну, може призвести до хронічної гіпоксемії, легеневої гіпертензії та правої серцевої недостатності. Особливо в країнах з низьким та середнім рівнем доходу, CWP може ускладнюватися інфекцією мікобактерії туберкульозу, особливо якщо вона пов'язана з впливом діоксиду кремнію та на більш пізніх стадіях.

Попередження CWP

CWP не виліковний, тому профілактика має вирішальне значення. CWP може бути пов'язаний зі зниженням функції легень ще до розвитку рентгенологічних змін у грудній клітці. Це дає можливість контролювати функцію легень за допомогою серійних спірометричних вимірювань, які проводяться, як мінімум, один раз на три роки, на додаток до рентгенографії. Наразі це рекомендовано шахтарям США, особливо при наявності симптомів сухого кашлю та/або прогресуючої задишки при фізичному навантаженні. Раннє виявлення CWP має важливе значення для впровадження належного управління та внесення потенційних змін у трудову діяльність. Однак, навіть після припинення впливу пилу, PMF може з'явитися або, якщо воно вже є, прогресувати, що проявляється прискореним зниженням функції легень та/або розвитком типових рентгенологічних змін. Комплексний і скоординований підхід до регулярного скринінгу є важливим для стратегій вторинної і третинної

профілактики, які можуть покращити якість і тривалість життя. У країнах з низьким і середнім рівнем доходу це може бути обмежено фінансовими обмеженнями, але це особливо важливо, оскільки концентрація пилу в повітрі може бути відносно високою, а туберкульоз легень може ускладнювати прогресуючий CWP та/або змішаний пиловий пневмоконіоз у 6-7% пацієнтів.19

Гірничі оператори всіх підземних і відкритих шахт несуть відповідальність за те, щоб експозиція вугільного пилу та діоксиду кремнію в повітрі залишалася нижче рекомендованих або нормативних рівнів. У деяких країнах методи відбору проб, які усереднюють концентрацію пилу в повітрі, можуть приховувати випадки, коли кілька випадкових проб значно перевищують гранично допустимі концентрації, які в іншому випадку можуть бути виявлені за допомогою постійного моніторингу. У період з 2012 по 2014 рік у Квінсленді, Австралія, середня концентрація пилу в повітрі, що вдихається працівниками, які працюють у лавах, була нижчою за рекомендовану межу в 3 мг/м^3, але періодично цей рівень перевищував 6 мг/м^3. Ці перевищення відбувалися, зокрема, протягом 2014 року, і за відсутності змін у практиці моніторингу це відповідає прогресуючій механізації. Хоча інженерне обладнання та процеси контролю пилу досить стандартизовані в усьому світі, обладнання та процеси, що застосовуються, можуть відрізнятися на різних шахтах. Носіння засобів захисту органів дихання може обмежити вплив пилу, але необхідна більш комплексна оцінка типу і практики.

З австралійської точки зору, шахтарям відкритих і підземних шахт рекомендується брати участь у системі періодичного нагляду для виявлення ранніх стадій CMDLD, шахтарі з групи ризику, які можуть бути частиною більш цілеспрямованого втручання, включають тих, хто зазнає раннього і більш тривалого впливу шахтного пилу, тих, хто зазнає більшого впливу кремнеземного пилу та/або тютюнового диму, і особливо тих, у кого спостерігаються респіраторні симптоми. Для більш точного документування реального впливу пилу на працівників можна використовувати персональні прилади безперервного моніторингу пилу. Першочергово система епіднагляду

вимагає скоординованого підходу до своєчасного звітування про результати тестів та ефективного інформування окремих шахтарів про потенційні випадки CMDLD.

Хоча використання низькодозового звичайного сканування та HRCT для скринінгу не є загальноприйнятим на міжнародному рівні, його перевага полягає в тому, що воно є більш чутливим у виявленні ретикулонодулярних патернів на ранніх стадіях пневмоконіозу, ніж звичайні плівки. Подальша оцінка цього потенційного скринінгового інструменту повинна охоплювати лікування потенційно злоякісних легеневих вузликів, особливо у шахтарів з іншими відомими факторами ризику. Принаймні в Австралії ця оцінка буде розширена, щоб включити можливість проведення таких досліджень, оскільки деяким шахтарям доведеться долати до 150 км до такого закладу, а також визначити, чи є це економічно ефективним на рівні популяції.

Пацієнтам з CMDLD слід пропонувати найкращу підтримуючу допомогу, яка включає уникнення впливу, припинення куріння, легеневу реабілітацію, відповідну компенсацію тягаря хвороби, домашній кисень і оцінку можливості трансплантації легень, якщо вони мають на це право.

Таким чином, аналіз літературних джерел показав, що пил створює значну шкоду здоров’ю працівників. Тому задачею особливої важливості є розробка засобів зниження пилового забруднення робочих зон.

1.3 Засоби захисту робочих зон від пилового забруднення

Аналіз літературних джерел дав можливість визначити такі методи боротьби з пиловим забрудненням повітря на промислових майданчиках:

1. Подача води на поверхню, де можливе пилоутворення (рис. 1.7).



Рисунок 1.7 – Змочування поверхні штабелю https://www.youtube.com/watch?v=8UljAOZM4Cw.

Переваги методу:

- простота організації;
- відносно невисока вартість;
- потрібна незначна кількість досить простого обладнання.

Недоліки методу:

- потрібне постійно діюче джерело води;
- вода, що йде на змочування поверхні, не може бути задіяна для рециркуляції, тобто має місце «незворотна» втрата ресурсу;
- при високій температурі оточуючого середовища має місце інтенсивне випаровування води зі змочуваної поверхні, тобто ефективність методу різко зменшується, що потребує повторну подачу води через короткий інтервал часу.
- при інтенсивному вітрові та зміні його напряму має місце нерівномірне змочування поверхі;
- потрібно мати спеціальні методи розрахунку для забезпечення раціональної подачі води на поверхню пилоутворення.

2. Подача спеціальних розчинів на поверхню пилоутворення.

Переваги методу:

- подача розчину на поверхню не потребує складного та дороговартісного обладнання;

- можливість використання відходів виробництва для виготовлення розчину.

Недоліки методу:

- приготування розчинів потребує спеціальних центрів (за кордоном такі центри мають назву «veneering stations»);
- необхідні ємності для зберігання розчину, його транспортування;
- необхідне обладнання для контролю якості обробки поверхонь;
- ефективність методу може суттєво залежати від параметрів навколишнього середовища (температура, вологість, швидкість вітру);
- вартість приготовлення розчину може бути високою.

3. Профілювання форми штабелів.

На практиці застосовуються різні форми штабелів з метою зменшення пилоутворення (рис. 1.8).

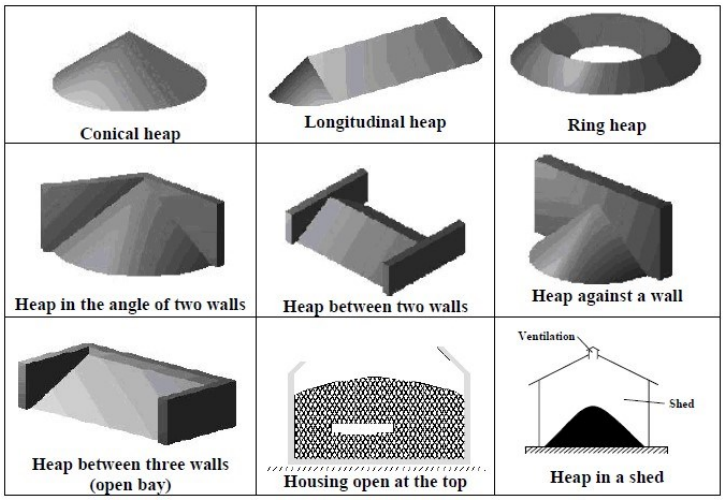


Рисунок 1.8 – Форма штабелей угля [105].

Ідея даного методу полягає в тому, що аеродинамічна форма штабеля впливає на локальну швидкість вітру та зменшення цієї швидкості, що дає можливість зменшити емісію пилу.

В літературних джерелах відсутня порівняльна інформація щодо ефективності використання тієї або іншої форми штабелю. Слід вказати, що профілювання форми штабелю потребує часу.

4. Використання суцільних бар’єрів.

Використання суцільних бар’єрів різної форми (в тому числі бар’єрів зі спеціальним покриттям) є дуже поширеною практикою при зменшенні поширення пилу на промислових майданчиках (рис.1.9-1.13).



Рисунок 1.9 – Вертикальний захисний бар’єр
на промисловому майданчику [114].



Рисунок 1.10 – Вертикальний захисний бар’єр складної форми [114].

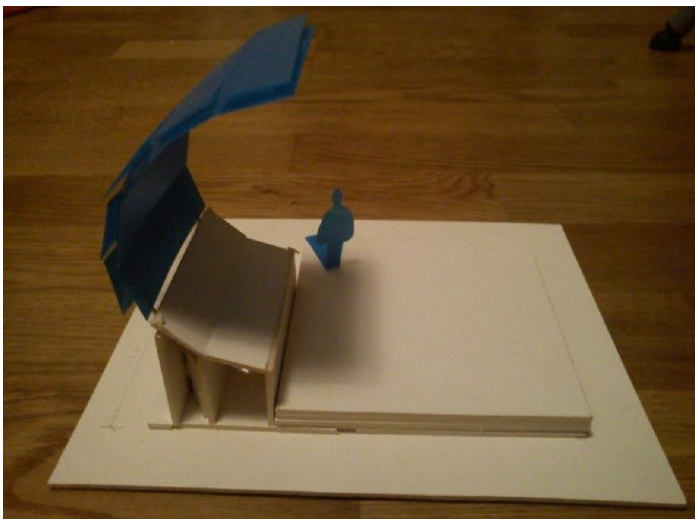


Рисунок 1.11 – Криволінійний захисний бар’єр [75].

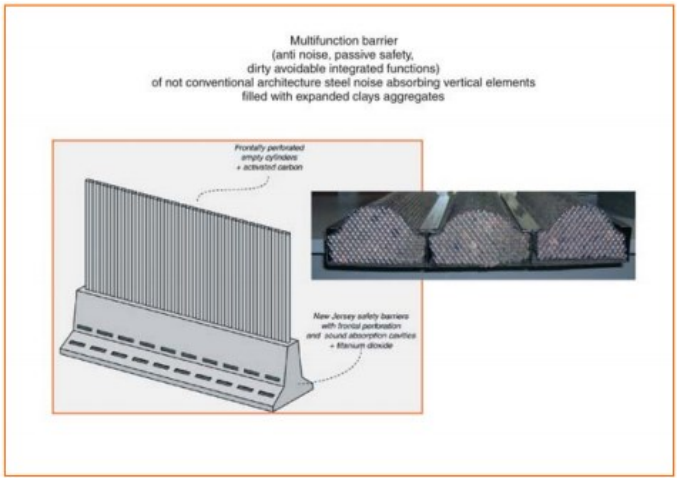


Рисунок 1.12 – Бар’єр з композитних матеріалів [114].

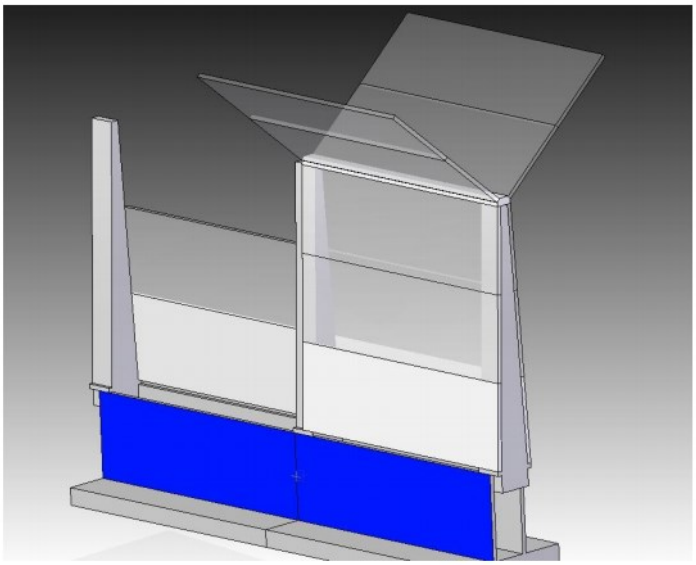


Рисунок 1.13 – Бар’єр Y–подібної форми [114].

Переваги методу:

- захисні бар'єри забезпечують захист повітря як від пилового забруднення, так і від шуму;

- дані захисні споруди прості та економічні;

- матеріал захисних бар'єрів – відходи промисловості.

Недоліки методу:

- ефективність захисних бар'єрів залежить від правильного визначення їхніх розмірів та розміщення на промисловому майданчику;

- на ефективність «роботи» бар'єрів значний вплив мають напрямок та швидкість вітру.

5. Використання перфорованих бар’єрів.

Аналіз джерел показав, що перфоровані бар’єри широко використовуються на промислових майданчиках (рис.1.14-1.18).



Рисунок 1.14 – Захисний перфорований бар’єр (https://www.windbreakpanels.com/product/windbreak-wall.html).



Рисунок 1.15 – Захисний перфорований бар’єр (https://www.windbreakpanels.com/product/windbreak-wall.html).

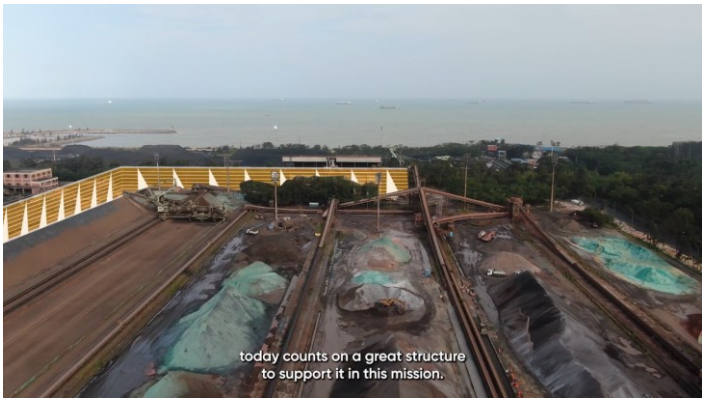


Рисунок 1.16 – Встановлення захисного перфорованого бар’єру (https://www.youtube.com/watch?v=8UljAOZM4Cw).

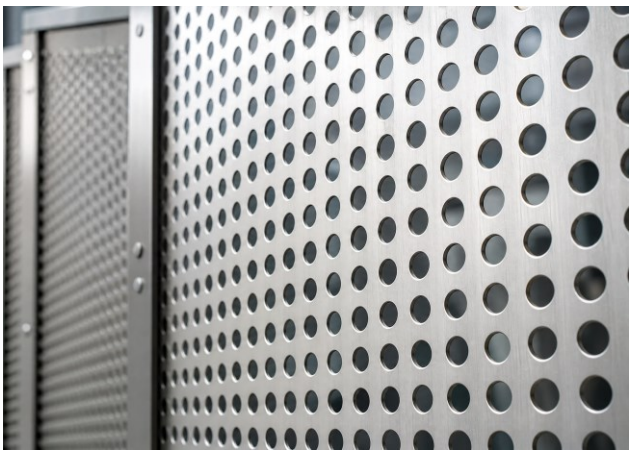


Рисунок 1.17 – Елементи захисного перфорованого бар’єру.

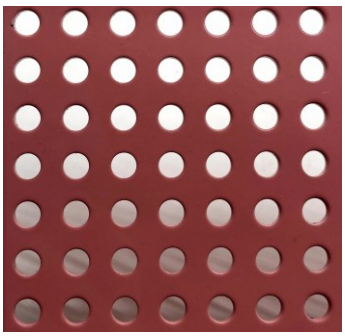


Рисунок 1.18 – Елементи захисного перфорованого бар’єру (www.dj-metal-mesh.com).

Переваги методу:

- ефективність захисту повітря від пилового забруднення;
- простота, економічність, оперативність встановлення;
- матеріал виробництва – відходи промисловості.

Недоліки методу:

- ефективність захисних бар'єрів залежить від правильного визначення їхніх розмірів та розміщення на промисловому майданчику;
- на ефективність «роботи» бар'єрів сильно впливає напрямок та швидкість вітру.

6. Використання системи «вентилятор + суцільний захисний бар'єр»

Одним з підходів по зменшенню забруднення повітря є використання системи «вентилятор+суцільний бар'єр». Вентилятор розташовується на захисному бар’єрі, у верхній його частині (рис. 1.19). При роботі вентилятора відбувається захоплення забрудненого повітря біля бар'єра та викид у зону вище бар'єра.

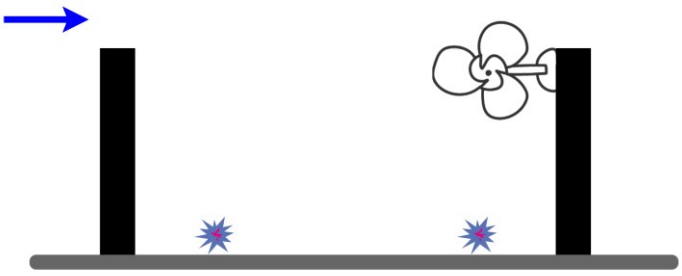


Рисунок 1.19 – Схема застосування системи «вентилятор+захисний бар’єр [80].

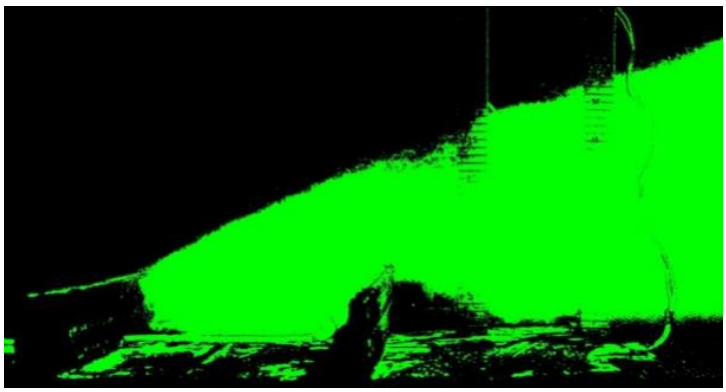


Рисунок 1.20 – Лабораторний експеримент по визначенню ефективності системи «вентилятор + бар'єр» [80].

Вентилятор «захоплює» забруднене повітря та здійснює його викид у верхній шар атмосфери, а наявність суцільного бар'єру створює перешкоду для поширення домішки в нижньому шарі повітря на промисловому майданчику.

Переваги методу:

- даний метод «еквівалентний» збільшенню висоти труби, що, як відомо, сприяє зменшенню рівня забруднення в нижньому шарі повітря;
- не потрібен значний час на реалізацію даного захисту;
- метод може «працювати» в будь-який час доби.

Недоліки методу:

- на ефективність методу впливає напрям та швидкість вітру;
- вентилятор може «захоплювати» домішку лише в межах спектру всмоктування: швидкість всмоктування обернено пропорційна відстані в квадраті від поверхні всмоктування, тому швидкість всмоктування дуже різко зменшується при збільшенні відстані від поверхні всмоктування вентилятора;
- потрібна значна витрата енергії на роботу вентилятора.

7. Використання локальних всмоктуючих систем

Локальні всмоктуючі системи розташовуються біля джерел емісії та створюють «пастки» для захоплення забрудненого повітря.

Переваги методу:

даний метод «еквівалентний» збільшенню висоти труби, що, як відомо, сприяє зменшенню рівня забруднення в нижньому шарі повітря;

- не потрібен значний час на реалізацію даного захисту;
- метод може «працювати» в будь-який час доби.

Недоліки методу:

- на ефективність методу впливає напрям та швидкість вітру;
- вентилятор може «захоплювати» домішку лише в межах спектру всмоктування: швидкість всмоктування обернено пропорційна відстані в квадраті від поверхні всмоктування, тому швидкість всмоктування дуже різко зменшується при збільшенні відстані від поверхні всмоктування вентилятора;
- на ефективність методу дуже впливає місце розташування вентилятору відносно джерела забруднення;
- потрібна значна витрата енергії на роботу вентилятора.

Також слід додати, що незалежно від того, який метод інженерного захисту буде обрано, найважливішим завданням залишається оцінка його ефективності на етапі проєктування.

Аналіз літературних джерел дозволяє визначити наступну наукову проблему: дефіцит розрахункових методів та моделей для обґрунтування параметрів та місця розташування захисних бар'єрів на промисловому майданчику. Існуючі методи розрахунку відносяться, як правило, до вертикальних, суцільних захисних бар'єрів (типу пластина). В науковій літературі відсутні закономірності повітряних потоків, що формуються на промислових майданчиках при застосуванні перфорованих бар'єрів або бар'єрів складної геометричної форми.

Висновки до розділу 1

1. Аналіз інформаційних матеріалів показав, що вугілля залишається одним із найпоширеніших джерел енергії, але видобуток вугілля, процес транспортування вугілля, розміщення вугілля на сховищах завжди супроводжується інтенсивним пиловим забрудненням повітря.

2. Вугільний пил є причиною багатьох захворювань людини, таких як астма, хронічне обструктивне захворювання легень, затримка розвитку легень, пневмоконіоз і рак легень, серцеві аритмії, гострий інфаркт міокарда тощо.

3. Для мінімізації шкоди працівникам від вугільного пилу потрібне не тільки системне обстеження робітників, але і створення ефективних засобів зниження рівня пилового забруднення робочих зон.

4. Проблема боротьби з пиловим забрудненням повітря в робочих зонах є пріоритетним напрямом охорони праці в гірничій промисловості.

5. Аналіз літературних джерел свідчить про те, що найбільш поширено використовуються захисні бар’єри для зменшення рівня пилового забруднення на промислових майданчиках, оскільки бар’єри можуть бути виготовлені з різного роду відходів, їх встановлення не потребує спеціального обладнання та великих витрат часу.

6. Дослідження свідчать про те, що останнім часом найбільш поширено використовуються перфоровані захисні бар’єри або бар’єри складної геометричної форми; наукове обґрунтування використання таких захисних бар’єрів потребує наявності у проєктувальників спеціальних методів розрахунку.

РОЗДІЛ 2
АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОСУ В ПРИКЛАДНИХ ЗАДАЧАХ ГІРНИЧО-ПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ

В розділі здійснено комплексний аналіз сучасних методів дослідження, що використовуються при рішенні різноманітних задач в області охорони праці.

2.1 Аналіз наукових досліджень по проблемі пилового забруднення повітря

Пилове забруднення повітря в робочих зонах на об’єктах гірничо-промислового комплексу є особливо важливою проблемою. У роботі [101] дослідження присвячене експериментальному аналізу ефективності повітряних завіс для знепилення шахтних вибоїв. Автори обґрунтовують переваги управління повітряними потоками над традиційними методами вентиляції та розпилення. На базі створеної фізичної моделі виявлено, що оптимізація співвідношення повітряних потоків дозволяє ефективно видаляти дрібнодисперсний пил і уникати зон його застою. Адекватність підходу підтверджена зіставленням результатів моделювання з польовими даними, що дає змогу впроваджувати ці рекомендації для створення «чистого виробництва» в гірничій галузі. Однак авторами не приділялась увага впливу спеціальних екранів на розподіл зон осідання частинок пилу або перфорованих поверхонь.

У роботі [142] приведені експерименти у аеродинамічний трубі, які дозволили вивчити закономірності дифузії та осадження будівельного пилу. Автори дослідили зміну концентрації часток залежно від швидкості вітру та відстані. Встановлено, що вміст пилу в повітрі знижується за чітким експоненціальним законом. Підтверджено, що основна маса піднятого матеріалу осаджується в безпосередній близькості до джерела, але дрібнодисперсні частки здатні поширюватися на більші дистанції. Дослідження допомагає оцінити зону

екологічного впливу великих будівельних майданчиків на міста. Отримані дані є критично важливими для розрахунку інтенсивності запилення територій при дії вітру. Результати експериментів вказують на необхідність обов'язкового використання бар'єрів навколо зон будівництва. Однак у експериментах не враховувався вплив міських перешкод, таких як дерева та будівлі. Однак автори зосередилися на гравійному та піщаному пилу, ігноруючи специфічні хімічні добавки цементу. Результати отримані в лабораторії, що може відрізнятися від реальної поривчастої атмосфери.

Робота [87] присвячена розробці технології пилопригнічення в зонах перевантаження вугілля, що є критичними джерелами запиленості. За допомогою CFD-моделювання та методу дискретних елементів автори дослідили двофазні потоки з урахуванням геометрії виробок. Виявлено, що вихрові структури та тяговий ефект конвеєрів сприяють накопиченню фракцій менше 20 мкм. На основі аналізу запропоновано систему пневматичного спірального розпилення. Створювана нею аерозольна завіса забезпечує ефективне захоплення частинок, що підтверджено шахтними випробуваннями: рівень пилу знизився на понад 90%. Однак у роботі не наводиться порівняльний аналіз енерговитрат запропонованої пневматичної системи у зіставленні з традиційними гідравлічними форсунками або стаціонарних засобів фізичних перешкод, останні взагалі не потребують енерговитрат.

Робота [139] присвячена динаміці поширення вугільного пилу у великих вибоях та оцінці методу мокрого пилопригнічення. За допомогою ПЗ FLUENT встановлено, що інтенсивне забруднення (до 1840 мг/м³) формується вже на 60-й секунді руху комбайна, а динамічна рівновага настає на 600-й секунді. Дослідження виявило зони найбільшого накопичення пилу на відстані 30–120 м від фронту опори. На основі цих даних впроваджено технологію багатостадійного зволоження, яка суттєво знизила запиленість у зоні оператора. Візуалізація траєкторій частинок дозволила глибше зрозуміти часові характеристики формування пилових хмар. Однак обсяг емпіричних даних,

представлених у дослідженні потребує додаткової верифікації результатів на інших площадках, де можливе розташування одразу великої кількості вугілля.

Робота [143] присвячена CFD-DPM моделюванню поширення та осадження вибухонебезпечного пилу в обмеженому просторі (ANSYS FLUENT). Основну увагу приділено механізмам взаємодії частинок зі стінками (прилипання/відбиття) для прогнозування зон накопичення. Використовуючи Лагранжів підхід, автори змоделювали концентрації 15–45 г/м³ та встановили, що динамічна рівновага зваженого пилу настає після 30 секунд розпилення. Доведено, що дрібні фракції розподіляються в об'ємі, а великі — осідають поблизу джерела. Модель дозволяє розрахувати критичний час до досягнення вибухонебезпечного стану, що настає при покритті пилом понад 5% площі приміщення. Однак у роботі немає оцінки впливу перфорації поверхні, геометричної форми та розмірів приміщення.

Робота [148] аналізує основні джерела утворення пилу на територіях відкритих кар'єрів. Розглянуто головні виробничі етапи, що формують високі концентрації небезпечного аерозолю. Описано фізичні властивості вапнякового пилу та розподіл часток за їхніми розмірами. Автори вказують на значну частку респірабельної фракції у повітрі забійної зони. Систематизовано сучасні технології придушення пилу для кожного окремого технологічного процесу. Детально представлено технічні параметри розпилювальних, аспіраційних та герметизуючих систем контролю. Наведено режими експлуатації обладнання для досягнення максимального результату очищення повітря. Експериментально підтверджено високу ефективність впровадження запропонованого комплексу захисних заходів. Повідомляється про зниження концентрації шкідливого пилу на понад вісімдесят відсотків. Робота орієнтована на безпосереднє практичне впровадження в умовах діючих підприємств. Однак у статті повністю відсутнє чисельне моделювання аеродинаміки складних пилових потоків.

Робота [141] присвячена оптимізації пилопоглинального укриття первинної дробильної станції відкритого кар'єру. Розглядається проблема високої запиленості та низької ефективності традиційних засобів знепилювання. Автори

пропонують сухе індукційне укриття із замкнутою циркуляцією забрудненого повітря. Дослідження базується на чисельному моделюванні складного газопилового двофазного потоку. Використано метод CFD-моделювання для детального аналізу аеродинаміки всередині пристрою. Показано суттєвий негативний вплив зовнішнього вітру на загальну ефективність пилопригнічення. Проведено структурну оптимізацію конструкції із застосуванням внутрішніх екранів та вентиляторів. Моделювання підтвердило посилення висхідного потоку та обмеження бічної дисперсії часток. Виконано успішну промислову апробацію розробленого пристрою в умовах реального кар'єру. Експериментально зафіксовано зниження концентрації пилу до встановлених екологічно допустимих значень. Однак у статті лише обмежено розглянуто вплив мінливих температурних та кліматичних факторів. Не наведено детального аналізу невизначеностей, що виникають при чисельному моделюванні процесів.

Робота [56] досліджує сучасні методи боротьби з вугільним пилом у підземних шахтах. Автори аналізують ефективність хімічних реагентів, піноподібних мас та ультразвукового розпилення. Особлива увага приділяється захисту персоналу від невиліковного захворювання — пневмоконіозу. Традиційне водяне зрошення часто не справляється з дрібнодисперсними та гідрофобними частками. У роботі порівнюються технічні переваги та недоліки різних систем пилопригнічення. Дослідники пропонують використовувати чисельні моделі для вивчення динаміки руху пилу. Важливим напрямком названо створення екологічно безпечних біологічних нано-плівок для поверхонь. Застосування мікробних технологій розглядається як перспективний метод контролю вторинного пилу. Якісний моніторинг складу повітря залишається критично важливим для безпеки видобутку. Стаття закликає до оптимізації змочувальних агентів для підвищення ефективності роботи. Однак представлений огляд має ряд обмежень, характерних для наукових робіт узагальнюючого типу. Автори роблять акцент на лабораторні показники, недостатньо аналізуючи економічну доцільність впровадження технологій.

Робота [33] описує експрес-моделювання розповсюдження пилу на промислових об’єктах за допомогою чисельних методів. Автори пропонують математичну модель для швидкого прогнозування концентрації забруднюючих речовин. У роботі використано рівняння переносу маси для розрахунку динаміки пилових потоків. Модель враховує вплив швидкості вітру та геометричних параметрів промислових будівель. Особлива увага приділена зонам аеродинамічної тіні, де накопичується найбільша кількість пилу. Дослідження дозволяє оперативно оцінювати ризики для екологічної безпеки робочих зон. Алгоритм розрахунку адаптований для швидкої реалізації на персональних комп’ютерах професійних аналітиків. Результати моделювання допомагають оптимізувати розміщення захисних екранів на території підприємства. Однак у дослідженні не враховано вплив різких температурних інверсій на розсіювання часток. Також авторська модель вимагає подальшої верифікації даними польових вимірювань за різних погодних умов.

У роботі [32] дослідження присвячене аналізу динаміки зміни вмісту вологи у вугіллі за різних швидкостей повітря. Автори розглядають процес випаровування вологи як ключовий фактор для розрахунку пилової емісії. Експериментально встановлено залежність між інтенсивністю повітряного потоку та швидкістю висихання вугільного матеріалу. У роботі представлено математичну модель, що описує зміну вологості поверхневого шару вугілля. Результати показують, що підвищення швидкості повітря призводить до швидкої втрати захисної вологи. Це спричиняє інтенсивне перетворення осілого пилу у зважений стан під впливом аеродинамічних сил. Отримані дані дозволяють уточнити параметри систем зрошення для підтримки необхідного рівня вологості. Дослідження є важливим для проєктування ефективних систем пилопригнічення на вугільних складах та виробах. Однак у статті не враховано вплив початкового гранулометричного складу вугілля на швидкість висихання. Також недостатньо досліджено взаємодію вологості матеріалу з хімічними змочувальними реагентами в потоці.

Огляд наведених статей демонструє еволюцію підходів до пилопригнічення: від класичних методів багатостадійного зволоження та зрошення до впровадження високотехнологічних вітрозахисних споруд з оптимізованою пористістю та комбінованих дефлекторів. Основним інструментом сучасних досліджень є комплексне чисельне моделювання (CFD, методи Fluent та дискретних частинок), що дозволяє візуалізувати складні вихрові структури та прогнозувати динаміку осадження дрібнодисперсних фракцій (PM10) у зонах аеродинамічної тіні.

Однак аналіз виявив певну наукову прогалину:

– недостатньо вивчено можливості захисних конструкцій, таких як пористі поверхні, різноманітні сітки або дефлектори;

– детальнішого вивчення вимагає вплив конфігурацій захисних конструкцій, що має велике значення;

– спостерігається дефіцит чисельних математичних моделей, які мають спрощені засоби розрахунку, порівняно з сучасними програмними пакетами по типу ANSYS;

– візуалізація процесів повітряного потоку та динаміки осідання виконується за допомогою пакетів по типу ANSYS, що створює потребу для більш простих засобів візуалізації.

2.2 Експериментальні методи дослідження

Для вирішення задач оцінювання рівня забруднення робочих зон, визначення ризику ураження персоналу використовуються такі експериментальні методи:

1. *Метод фізичного моделювання в польових умовах (field experiments,* full-scale study).

2. *Метод фізичного моделювання в лабораторних умовах* (small-scale study).

Складність у проведенні натурного експерименту (full-scale study) в рамках даної проблеми є очевидною, що пов'язано з, зокрема, наступними факторами:

1) великі розміри джерел виділення пилу (штабель вугілля може мати висоту 20-30 м, довжина – десятки метрів);

2) значна складність вимірювання концентрації пилу одночасно на промисловому майданчику для різних реперних точок ;

3) значна складність аналізу результатів експериментальних досліджень (на ці результати впливають, зокрема, флуктуації швидкості повітря);

4) можливий вплив на концентрацію домішки у реперній точці винесення пилу від іншого штабелю;

5) вплив на заміри у реперної точці «вторинного» забруднення, коли вітер здіймає пил, що вже потрапив на поверхню землі;

6) необхідність застосування дороговартісного вимірювального обладнання;

7) зміна метеоситуації на дослідному майданчику може значно «спотворити» результати вимірювань та привести до хибних висновків;

8) витрата значного часу на проведення вимірювань;

9) потреба у значному часі на аналіз, обробку, систематизацію результатів вимірювань;

10) потреба у «повторюванні» вимірювання при виявленні «незрозумілих» результатів експерименту; але дослідник не може знову повторити метеоситуацію, при якій були отримані попередні результати.

Окремим напрямом проведення фізичного експерименту є визначення певних параметрів, що характеризують процеси тепломасопередачі в робочих зонах, наприклад, визначення:

- коефіцієнтів аеродинамічного опору захисних конструкцій ;

- визначення інтенсивності пилоутворення при різних метеорологічних умовах;

- визначення коефіцієнтів сорбції небезпечних речовин на певних поверхнях.

Визначення таких параметрів дає можливість будувати комплексні математичні моделі для рішення багатофакторних задач тепломасопереносу в проблемі охорони праці.

Метою організації фізичного експерименту у лабораторіях є визначення певних параметрів навколишнього середовища у робочих зонах, зокрема, при використанні різних засобів зниження антропогенного навантаження на параметри мікроклімату.

Проведення лабораторних досліджень, в багатьох випадках, потребує використання певного спеціалізованого обладнання. Слід підкреслити, що для багатьох прикладних задач таке обладнання є унікальним, наприклад, при дослідженні процесів руху ударної хвилі (рис. 2.1-2.4).



Рисунок 2.1 – Експериментальна установка для дослідження пилового забруднення повітря [91].



Рисунок 2.2 – Експериментальна установка для дослідження руху ударної хвилі [110].

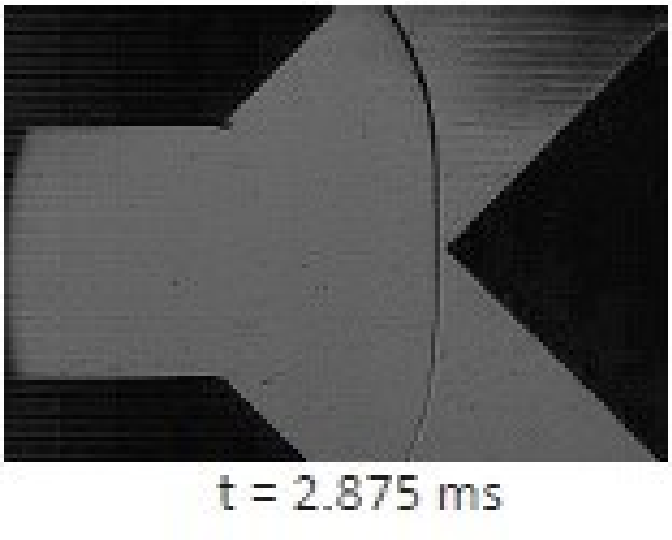


Рисунок 2.3 – Фото ударної хвилі [110].

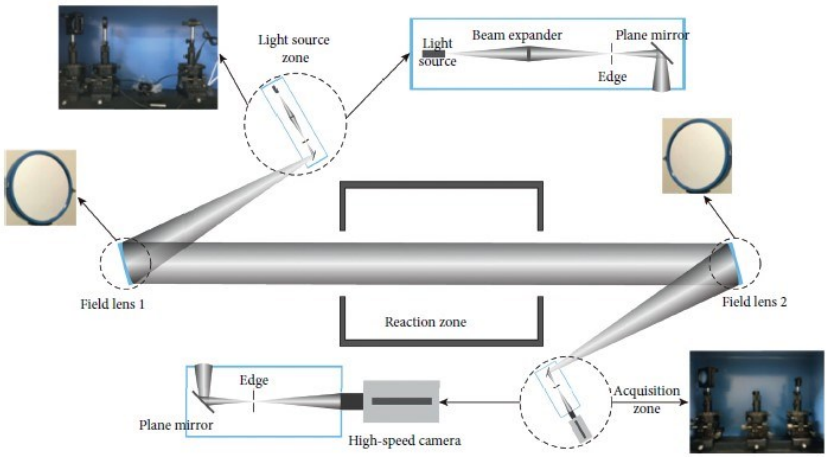


Рисунок 2.4 – Схема шлірен-фото системи для дослідження руху ударної хвилі [145].

Метод лабораторного моделювання широко використовується при дослідженні пилового забруднення робочих зон на об’єктах гірничо-промислового комплексу (рис. 2.5), при оцінці ефективності застосування захисних бар’єрів для мінімізації рівня забруднення повітря на промислових майданчиках (рис. 2.6-2.8).

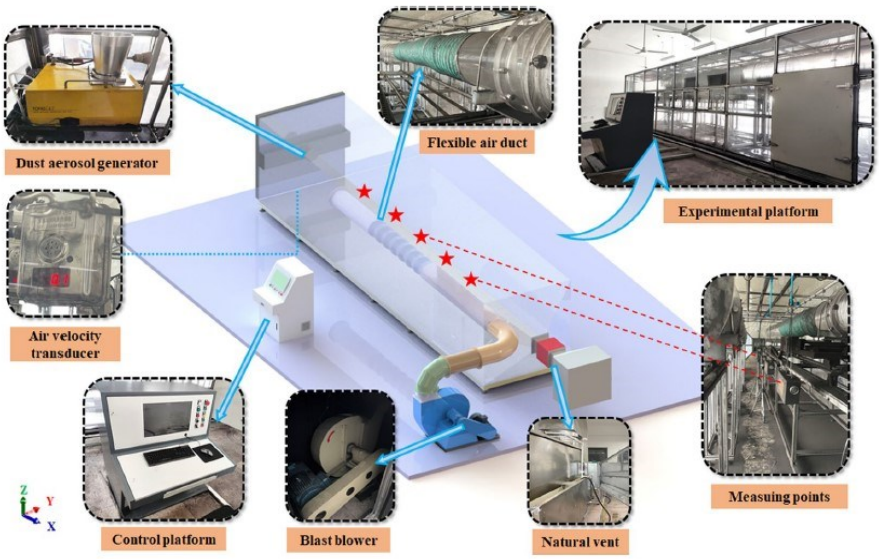


Рисунок 2.5 – Схема платформи для дослідження пилового забруднення робочих зон [147].

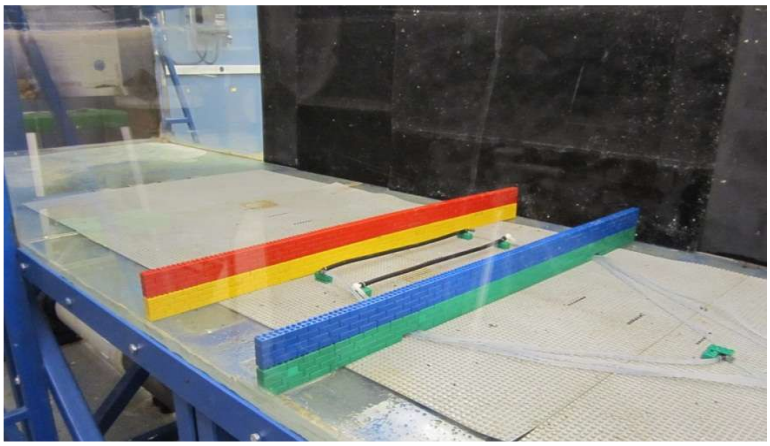


Рисунок 2.6 – Модель захисних бар’єрів в лабораторії [80].

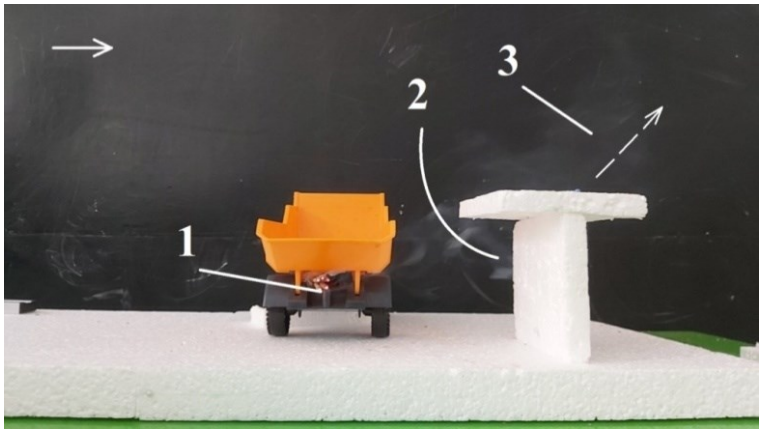


Рисунок 2.7 – Модель захисних бар’єрів в лабораторії [10].

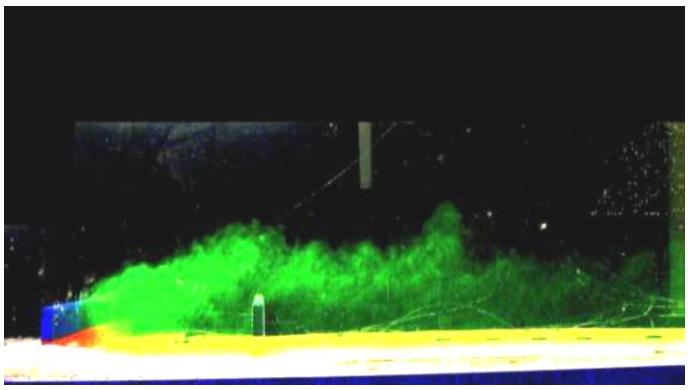


Рисунок 2.8 – Експериментальне дослідження ефективності використання захисного бар’єру [80].

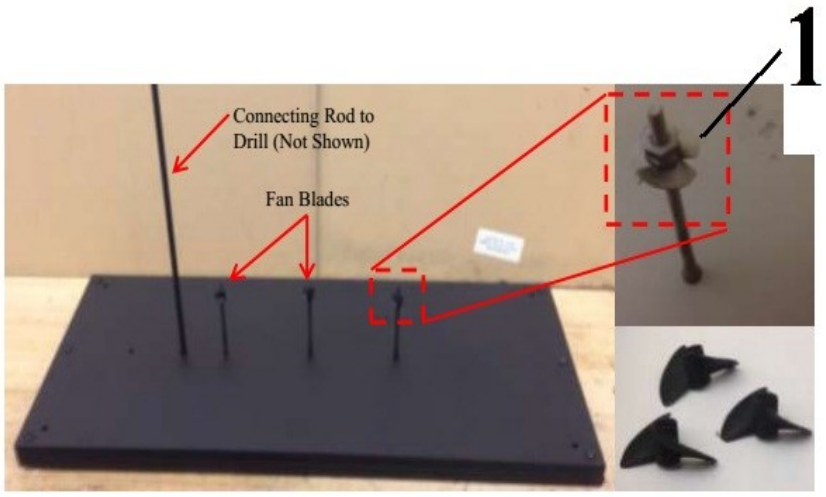


Рисунок 2.9 – Модель аксіального вентилятора, що встановлюється на захисний бар’єр (експеримент в аеродинамічній трубі) [80].

Слід зазначити наступні переваги методів лабораторного дослідження:

1. Можливість отримання важливих даних для побудови складних математичних моделей аеродинаміки та тепломасопереносу.

2. Можливість отримання закономірностей утворення областей забруднення в робочих зонах.

3. Можливість оцінювання ефективності захисту працівників від різних типів техногенного впливу на робочих місцях.

4. Можливість візуально бачити певні характерні особливості процесів, що моделюються.

5. Результати вимірювань дають можливість визначити важливі параметри процесів тепломасопереносу (наприклад, коефіцієнт дифузії).

В цілому, метод фізичного моделювання дає «наочну» інтерпретацію результатів.

В якості недоліків експериментальних досліджень в лабораторіях слід вказати на наступне:

1. Постановка та проведення експериментальних досліджень потребує значного часу, якого доволі часто є обмаль у дослідника при виконанні проєктних робіт.

2. Для організації лабораторного експерименту потрібне дороговартісне обладнання.

3. Обробка даних вимірювань, їх аналіз та узагальнення потребує кваліфікованих кадрів.

4. Необхідним є значний час на проведення експерименту, оскільки завжди проводиться «серія» вимірювань та «вибракування» деяких даних.

5. В багатьох випадках потрібен значний час на обробку результатів експериментальних вимірювань.

6. Ймовірність отримання «неякісних» даних при застосуванні «неякісного» експериментального.

7. Неможливість організації лабораторного експерименту для ряду прикладних задач.

8. Проблема проведення лабораторного експерименту з умовою виконання певних критеріїв подібності (число Рейнольдса, число Фруда тощо).

Слід зазначити, що при проведенні лабораторного експерименту на моделях без врахування критеріїв подібності може привести до «некоректної» інтерпретації результатів проведених вимірювань.

2.3 Метод математичного моделювання

Метод математичного моделювання є найбільш поширеним інструментом вивчення різноманітних процесів пилового, теплового забруднення робочих зон, дослідження нестаціонарних процесів теплопереносу, руху повітря на промислових майданчиках. Тому значна увага приділяється розвитку математичних моделей різного рівня для рішення широкого кола прикладних задач в галузі. Розглянемо математичні моделі, що відносяться, в першу чергу, до проблеми моделювання пилового забруднення повітря в робочих зонах. При викладенні даного питання використовувались роботи [51, 98, 100, 112, 113, 122].

2.3.1 Емпіричні моделі, модель «Чорного ящика» (Box Model) та Screening Models

Емпіричні моделі широко використовуються при рішенні багатьох задач в галузі охорони праці. Ці моделі є «узагальненням» результатів експериментальних досліджень, польових спостережень. Моделі мають вигляд алгебраїчних співвідношень (розрахункових формул), що зручні для практичного використання. Розрахункові формули містять один або декілька важливих параметрів, що впливають на процес, що досліджується [27-33]. Як правило, емпіричні моделі не містять спеціальних функцій, інтегралів тощо. Для використання цих моделей не потрібен комп'ютер та спеціальна підготовка користувача. Наприклад, найбільш простою емпіричною моделлю є модель для визначення концентрації *CO* (C_{CO}, *млн*$^{-1}$) над краєм проїжджої частини автомагістралі (Д'яконов А. Б.):

$$C_{CO} = 1{,}53 \cdot N^{0{,}368},$$

де N – інтенсивність руху, авт/год. Дану модель отримано на основі обробки експериментальних даних по вимірюванням, що проведені в Нью-Йорку.

Вкрай важливим є те, що емпіричні моделі дають можливість визначити суттєві закономірності фізичного процесу, що досліджується. Слід відзначити, що дані моделі можуть бути «інкорпоровані» в «тіло» складних багатофакторних моделей для оперативного рішення складних задач в галузі охорони праці.

Наприклад, емпірична модель, що побудована для визначення кількість пилу, що «захоплює» крапля води, дає можливість здійснити науково обґрунтоване CFD моделювання процесу пилоутворення шляхом розпилу води у забрудненому середовищі.

Як недолік, слід відзначити те, що емпіричні моделі можуть бути використані лише для умов, для яких були отримані відповідні експериментальні дані;

Box Models – це найпростіший з алгоритмів моделювання. Він передбачає, що повітряний басейн має форму паралелепіпеда. Вважається, що повітря всередині «коробки» (box) має однорідну концентрацію. Box Model представлена наступним рівнянням:

$$\frac{dCV}{dt} = QA + uC_{in}WH - uCWH,$$

де Q – рівень викидів забруднюючих речовин на одиницю площі; C – однорідна концентрація частинок у повітряному басейні; V – об'єм повітряного басейну; C_{in} – концентрація частинок, що потрапляють у повітряний басейн; A – площа повітряного басейну (The Box) у уплані ($L \times W$); L – довжина повітряного басейну; W – ширина повітряного басейну; H – висота повітряного басейну; u – швидкість вітру, нормальна до повітряного басейну.

Хоча ця модель є корисною, вона має певні обмеження. Вона припускає, що забруднювач є однорідним на всій території повітряного басейну і використовується для оцінки середніх концентрацій забруднювача на дуже великій території. Ця математична модель дуже обмежена у своїй здатності прогнозувати розсіювання забруднювача над повітряним басейном через її нездатність використовувати просторову інформацію [82].

Screening Models – *це група* моделей (або кодів), що призначені для первинної, «грубої» оцінки рівня забруднення атмосфери, та використовуються на першому етапі прогнозування, перед застосовуванням більш точних моделі,

наприклад, за відсутності максимально достовірних вихідних даних для моделювання. Вплив перешкод та захисних бар'єрів на процес перенесення домішок у цих моделях не враховується.

Моделі цієї групи не можуть забезпечити диференціацію концентрації домішок по висоті та в інших напрямках.

2.3.2 Аналітичні моделі

Аналітичні моделі активно використовуються при вирішенні задач масопереносу [59, 78, 79, 82, 122]. Відомо, що при певних спрощеннях, рівняння конвективно-дифузійного перенесення домішки в повітрі має аналітичне рішення (миттєвий викид):

$$C(x,y,z,t)=\frac{Q}{(4\pi t)^{\frac{3}{2}}\sqrt{K_xK_yK_z}}\cdot\exp\left[-\frac{(x-Wt-x_0)^2}{4K_yt}-\frac{(y-y_0)^2}{4K_yt}\right]\cdot$$
$$\left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4K_zt}+\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{4K_zt}\right)\right)\right]$$

де Q – потужність викиду; K_x, K_y, K_z – коефіцієнти дифузії; W – швидкість вітру; x_0, y_0, H – координати джерела викиду; x, y, z – координати рецептора; t – час.

Таким чином, знаючи координати розташування джерел викиду забруднюючої речовини, на основі цієї залежності розраховується динаміка зміни концентрації домішки в повітрі при «миттєвому» викиді.

У ряді випадків для моделювання забруднення повітря робочих зон використовують аналітичне рішення рівняння перенесення домішки в атмосфері для модельної ситуації типу «*постійний точковий викид*». Аналітичне рішення має вигляд:

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{4\pi kx}\exp\left[-\frac{y^2}{4kx/W}\right]\cdot\left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{4kx/W}\right)+\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{4kx/W}\right)\right].$$

Така модель дає можливість розрахувати концентрацію домішки на різній відстані від джерела емісії та визначити області, де можливе перевищення ГДК.

Прикладом аналітичної моделі, що створена на базі моделі Гауса (розрахунок концентрації домішки у повітрі) є модель CAR-FMI:

$$C_u\left(x_w,z\right)=\frac{1}{\sqrt{4\pi uK_z x_w}}\left\{\exp\left[-\frac{u\left(z-h_{eff}\right)^2}{4K_z x_w}\right]+\exp\left[-\frac{u\left(z+h_{eff}\right)^2}{4K_z x_w}\right]\right\}-$$

$$-\frac{v_d}{uK_z}\exp\left[\frac{v_d\left(z+h_{eff}\right)}{K_z}+\frac{v_d^2}{u}\frac{x_w}{K_z}\right]erfc\left[\frac{z+h_{eff}+\frac{2v_d x_w}{u}}{2\sqrt{\frac{K_z x_w}{u}}}\right],$$

де u – швидкість вітру; K_z – коефіцієнт дифузії; x_w, z – координати рецептора; h_{eff} – ефективна висота викиду; v_d – швидкість джерела емісії домішки.

Hotchkiss та Harlow запропоноували аналітичну модель для прогнозування концентрації забруднювачів. Концентрація домішки розраховується так:

$$C_s=S\left[\frac{1}{u_w}-\frac{y}{v_t}\right]-\frac{Su_n y}{4kv_t^2\left(1-\beta\right)}\left[e^{ky}\left(1-ky\right)-\beta e^{-ky}\left(1+ky\right)\cos\left(kx\right)\right],$$

де $S=Q/W$ – інтенсивність викидів; $u_w=\left(\frac{v_t u_t}{W}\right)^{1/2}$ – швидкість «провітрювання» каньйону; x, y – координати рецептора; $v_t=L\sqrt{(\alpha_1 u_1)^2+u_s^2}$ – швидкість дифузії вихору; u_n– компонента швидкості вітру, перпендикулярна до осей каньйону; u_t – швидкість вітру на рівні даху; u_s – швидкість потоку, спричинена рухом джерела випромінювання; L – характерний розмір, який можна вважати рівним ширині каньйону W.

Дуже ефективно використовуються аналітичні методи для рішення задач теплообміну. Слід підкреслити, що в Україні сформувалися широко відомі наукові школи в області рішення задач теплопровідності та теплообміну, це: Інститут кібернетики, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Національний університет цивільного захисту України, Інститут технічної теплофізики НАН України, Національний університет «Львівська Політехніка», Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

На практиці для рішення задач теплопровідності, теплообміну використовують широкий клас методів теоретичного рішення задач: це використання функцій Гріна, метод інтегральних перетворень у нескінченних межах, у скінченних межах, метод теплових потенціалів, метод Фур'є, варіаційні методи (метод Ріца, метод Канторовича, метод Треффца, метод Лейбензона, метод Біо), методи лінеаризації, метод колокацій, метод Бубнова-Гальоркіна, sнтегральні методи; методи зведення крайової задачі до рівнянь іншого типу (наприклад, зведення крайової задачі з нелінійними граничними умовами до еквівалентного нелінійного функціонального рівняння), зведення крайової задачі теплопровідності до крайової задачі для звичайного диференційного рівняння з нелінійними граничними умовами.

Слід підкреслити, що превагою даних аналітичних моделей є врахування таких важливих параметрів, як швидкість та напрям руху повітряних мас, атмосферної дифузії, інтенсивності емісії домішки від джерела. Але моделі мають певні недоліки:

1. Моделі не враховують зміну профілю швидкості вітру за висотою та залежність коефіцієнтів дифузії від швидкості вітру та висоти.

2. Моделі не враховують вплив перешкод на процес перенесення домішок.

3. Моделі дають рішення для суттєво «спрощених» задач.

2.3.3 Моделі Гауса та Сеттона

Гаусові моделі [51, 53, 54, 90, 100, 104, 111] є найпоширенішими математичними моделями, що використовуються для розрахунку розсіювання в повітрі пилу або іншої домішки в США, ЄС. Вони базуються на припущенні, що забруднювач розсіюється відповідно до нормального статистичного розподілу. Спрощене рівняння Гауса, яке зазвичай використовується для точкових викидів, виглядає наступним чином:

$$\chi = \frac{Q}{2\pi u_s \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2 + \left(\frac{H}{\sigma_z}\right)^2\right)}$$

де χ – погодинна концентрація на відстані *x* у напрямку повітряного потоку; *Q* – інтенсивність викидів забруднюючих речовин; u_s – середня швидкість вітру на висоті викиду; σ_y, σ_z – стандартне відхилення поперечного та вертикального розподілу концентрації; *y* – відстань від джерела до реципієнта у поперечному напрямку; *H* – висота штабеля або висота іншого джерела викидів.

Загальний вигляд моделі Гауса такий (залежність для визначення невідомої концентрації домішки φ):

$$\varphi(x,y,z)=\frac{Q}{2\pi\cdot U\cdot\sigma_y\sigma_z}\cdot\exp\left[\frac{-y^2}{2\mu_y^2}\right]\cdot\left\{\exp\left[\frac{-(z-H)^2}{2\mu_z^2}\right]\right\}+$$
$$+\left\{+\exp\left[\frac{-(z+H)^2}{2\mu_z^2}\right]\right\},$$

де $\sigma_y^2=\frac{2\mu_y\cdot x}{U},\sigma_z^2=\frac{2\mu_z\cdot x}{U}$ – коефіцієнти дисперсії; μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентності дифузії домішки; *x* – відстань від джерела забруднення до рецептора; *U* – швидкість вітру, м/с; *Q* – інтенсивність викиду точкового джерела емісії, кг/с; *H* – висота джерела емісії, м.

Hargreaves D. M. та ін. запропонували модифіковану модель Гауса для прогнозування рівня забруднення повітря:

$$c(x_r,y_r,z_r,t)=\sum_{p=1}^{N_p}\left(\frac{Q\Delta t}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}(\sigma_x)_p(\sigma_y)_p(\sigma_z)_p}\right)X(x_r)\cdot Y(y_r)\cdot Z(z_r),$$

де

$$X(x_r)=\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x_r-x_p}{(\sigma_x)_p}\right)^2\right\},$$

$$Y(y_r)=\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y_r-y_p}{(\sigma_y)_p}\right)^2\right\}+\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{y_r+y_p}{(\sigma_y)_p}\right)^2\right\}+\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{2B-y_r-y_p}{(\sigma_y)_p}\right)^2\right\},$$

$$Z(z_r)=\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r-z_p}{(\sigma_z)_p}\right)^2\right\}+\exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{z_r+z_p}{(\sigma_z)_p}\right)^2\right\},$$

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – параметри дисперсії, що враховують розміри джерела емісії домішки та розширення скупчення з плином часу; (x_r, y_r, z_r) – координати рецептора, (x_p, y_p, z_p) – координати центра *p*–го «клубка».

При моделюванні викиду від лінійного джерела емісії домішки (наприклад, довгий штабель вугілля на території морського порту) використовується модель Гауса для лінійного джерела забруднення:

$$\varphi = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z \cdot U} \cdot \left[\exp\left[-\frac{(Z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp\left[-\frac{(Z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right],$$

де Q – інтенсивність викиду.

Величини σ_y, σ_z є стандартними відхиленнями горизонтального і вертикального гаусівських розподілів, які використовуються для представлення шлейфу забруднювача. Ці коефіцієнти базуються на коефіцієнтах стійкості атмосфери, створених Пасквілем і Гіффордом, і вони, як правило, стають більшими зі збільшенням відстані з підвітряного боку від джерела. Більші стандартні відхилення означають, що гаусова крива або шлейф має низький пік і широкий розкид; менші стандартні відхилення означають, що гаусова крива або шлейф має високий пік і вузький розкид [117].

При використанні цього рівняння для розрахунку розсіювання забруднюючих речовин існують деякі припущення: 1) викиди повинні бути постійними і рівномірними; 2) напрямок і швидкість вітру є постійними; 3) дифузія за вітром є незначною порівняно з вертикальною і поперечною дифузією; 4) місцевість є відносно рівнинною, тобто немає перехресних перешкод, немає бар'єрів для поперечного вітру; 5) не відбувається осадження або поглинання забруднювача; 6) вертикальна і поперечна дифузія забруднювача слідують гаусівському розподілу; 7) форма факела може бути представлена конусом, що розширюється; 8) використання горизонтальних і вертикальних

стандартних відхилень, σ_y, σ_z, вимагає, щоб турбулентність факела була однорідною по всій довжині факела [59].

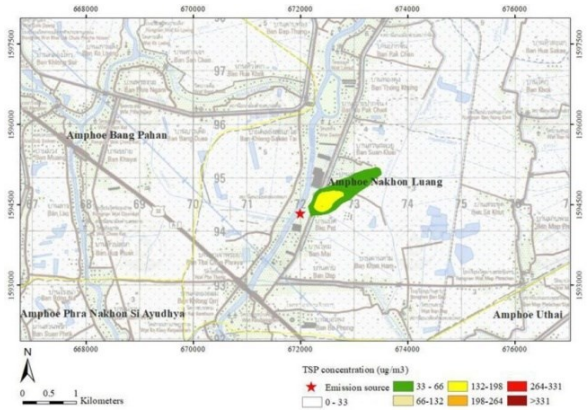


Рисунок 2.10 – Область пилового забруднення, емісія від штабелю [130].

Точність цієї моделі для прогнозування концентрацій забруднюючих речовин знаходиться в межах 20% для приземних викидів на відстані менше 1 км. Для надземних викидів точність знаходиться в межах 40%. На відстанях більше 1 км точність оцінюється в межах коефіцієнта 2 (двократне відхилення від реальних даних). Гаусова модель також має обмеження – вона не застосовна при прогнозуванні концентрацій для проміжку часу менше години [82].

Слід зазначити, що існують комерційні пакети (коди), що реалізують модель Гауса для проведення досліджень по визначенню областей пилового забруднення повітря від різних техногенних джерел. Прикладом таких комерційних кодів є коди AERMOD (рис.2.11), CAMEO/ALOHA [90, 118].

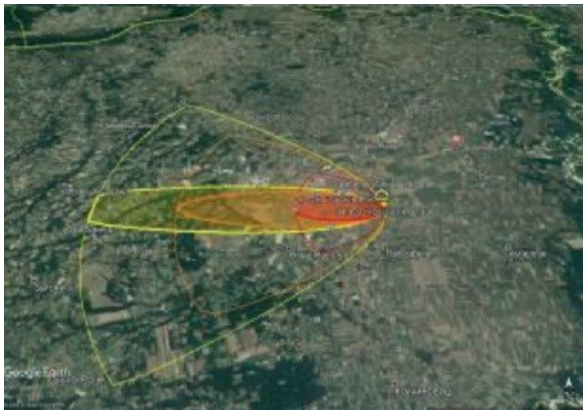


Рисунок 2.11 – Зона забруднення атмосферного повітря, розрахунок на базі моделі Гауса, код ALOHA [104].

Близьким аналогом моделі Гауса є модель Сеттона:

$$C(x,y,z)=\frac{Q}{\pi\cdot\mu_y\cdot\mu_z\cdot U\cdot x^{(2-n)}}\times$$

$$\times\exp\left(-\frac{y^2}{\mu_y^2x^{2-n}}\right)\cdot\left[\exp\left(-\frac{(z-h)^2}{\mu_z^2x^{2-n}}\right)+\exp\left(-\frac{(z+h)^2}{\mu_z^2x^{2-n}}\right)\right];$$

де C – концентрація домішки у точці з координатами (x, y, z); n – параметр, що пов'язаний зі станом атмосфери; μ_x., μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії; U – швидкість повітря; h – висота викиду домішки; Q – потужність викиду.

Параметр n змінюється від 0 до 1. Наприклад, n=1/4 – для нейтральних умов, n=1/2 – для потужної інверсії.

Застосування моделі Гауса потребує обґрунтування параметрів дисперсії до конкретного регіону. Застосування моделі Сеттона потребує обґрунтування параметра n для конкретних умов задачі.

Слід підкреслити, що перевагами моделей Гауса та Сеттона є врахування важливих фізичних параметрів: швидкість повітряного потоку та стан атмосфери, інтенсивність емісії джерела домішки.

2.3.4 Модель Ейлера

Ейлерові моделі розв'язують рівняння збереження маси для заданого забруднювача. Рівняння, як правило, має вигляд [82]:

$$\frac{\partial\langle c_i\rangle}{\partial t}=-\bar{u}\cdot\nabla\langle c_i\rangle-\nabla\langle c_i'u'\rangle+D\nabla^2\langle c_i\rangle+\langle S_i\rangle \qquad (2.1)$$

де $u=\bar{u}+u'$ – вектор швидкості вітру; $\bar{u}$ – вектор середньої швидкості вітру; u' – флуктуація вектора швидкості вітру; $c=\langle c\rangle+c'$ – концентрація забруднювача; $\langle c\rangle$ – середня концентрація забруднювача; c' – флуктуація концентрації забруднювача; D – молекулярний коефіцієнт дифузії; S_i – джерело забруднення.

Рівняння (2.1) може бути складним для розв'язання, оскільки член адвекції $\bar{u}\cdot\nabla\langle c_i\rangle$ є гіперболічним, член турбулентної дифузії – параболічним, а член джерела, як правило, визначається набором диференціальних рівнянь.

Розв'язання такого типу рівнянь може бути дуже витратним і вимагає певної оптимізації для скорочення часу, необхідного для його розв'язання. Рішення були досягнуті шляхом зведення задачі до одного та двох вимірів замість використання трьох вимірів [82].

2.3.5 Модель Лагранжа

Лагранжеві моделі прогнозують розсіювання забруднювачів на основі рухомої опорної сітки. Ця рухома опорна сітка, як правило, базується на переважному напрямку вітру, або загальному напрямку руху пилового шлейфу. Модель Лагранжа має наступний вигляд:

$$\left\langle c(r,t)\right\rangle = \iint p(r,t \mid r',t')S(r',t')dr'dt'$$

де $\left\langle c(r,t)\right\rangle$ – середня концентрація забруднювача у момент часу t у точці з радіус-вектором r; $S(r',t')$ – джерело емісії; $p(r,t \mid r',t')$ – функція ймовірності того, що частинка повітря рухається з місця r' у момент часу t' (джерело) до місця r у момент часу t.

Функція ймовірності повинна бути отримана як функція переважаючої метеорологічної ситуації, що підходить для джерел, які складаються з газів. Якщо джерело викидів складається з частинок, то у функцію необхідно включити більше інформації, наприклад, розподіл частинок за розмірами та щільність частинок [82].

Ця математична модель має обмеження, коли її результати порівнюються з реальними вимірюваннями. Це пов'язано з динамічною природою моделі. Вимірювання, як правило, проводяться в стаціонарних точках, тоді як модель прогнозує концентрацію забруднюючих речовин на основі рухомої опорної сітки. Це ускладнює перевірку моделі під час першого використання. Щоб компенсувати цю проблему, лагранжеві моделі зазвичай модифікують, додаючи ейлерову референтну сітку. Це дозволяє краще порівнювати з фактичними вимірами, оскільки включає в модель статичну референтну сітку [82].

Ці чотири математичні моделі є основними підходами, що використовуються для моделювання дисперсії повітря. Існує багато варіацій на

основі цих рівнянь. Деякі варіації додають статистичні функції для представлення випадковості напрямку вітру, швидкості вітру і турбулентності; інші включають введення специфічних для конкретної місцевості членів джерела. Завдяки зростанню обчислювальної потужності персональних комп'ютерів, моделі стали більш складними і різноманітними. Це призвело до створення величезної кількості комп'ютерних моделей дисперсії повітря.

2.3.6 Моделі поширення забруднення при підземній розробці родовищ

Моделювання дисперсії повітря не оминуло і гірничодобувну промисловість. Було створено низку моделей для конкретних шахт. Більшість моделей, які були підтверджені тестуванням на шахтних майданчиках, були розроблені для підземних шахт. У центрі уваги багатьох досліджень підземних шахт, що підтверджували моделі, був пил, що вдихається. Однак ці моделі також мають позитивну особливість, яка полягає в тому, що вони здатні прогнозувати дисперсію частинок пилу всіх фракцій.

Hwang та ін. [103] обговорили кілька моделей для прогнозування розсіювання пилу в підземному вході за допомогою турбулентного газового потоку, іншими словами, «прогнозування розсіювання пилу після вибуху». Основне рівняння дифузії було записано так:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u\frac{\partial c}{\partial z} = k\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2}\right), \tag{2.2}$$

де c – концентрація пилу; u – швидкість повітря; k – коефіцієнт дифузії; x, y, z – декартові координати; t – час.

Це рівняння можна описати як таке, що використовує підхід Ейлера, оскільки воно враховує збереження маси і припускає стаціонарну систему відліку. З рівняння (2.2) можна отримати математичні інтерпретації процесу моделювання для чотирьох різних типів джерел: точкове джерело, лінійне джерело, рухоме лінійне джерело і плоска поверхня. Ці варіанти для різних джерел є гаусовими за своєю природою. Наприклад, розв’язок для імпульсного точкового джерела в площині $z=z_1$ в точці (x_1, y_1) у момент часу $t=t_1$ має вигляд рівняння (2.3):

$$c = \frac{Q}{2ab\left[\pi k\left(t-t_1\right)\right]^{1/2}}\left(1+2\sum_{m=1}^{\infty} e^{-\frac{km^2\pi^2\left(t-t_1\right)}{a^2}}\cdot\cos\frac{m\pi x}{a}\cos\frac{m\pi x_1}{a}\right)\times$$
$$\times\left(1+2\sum_{n=1}^{\infty} e^{-\frac{kn^2\pi^2\left(t-t_1\right)}{b^2}}\cdot\cos\frac{n\pi y}{b}\cos\frac{n\pi y_1}{b}\right). \quad (2.3)$$

де c – концентрація пилу; u – швидкість повітря; k – коефіцієнт дифузії; x, y, z – декартові координати; t – час; a – висота входу для повітря; b – ширина входу для повітря; n – відстань у напрямку, нормальному до межі або стінок отвору (приймається для напрямку y); m – відстань у напрямку, нормальному до межі або стінок отвору (приймається для напрямку x); Q – інтенсивність точкового джерела емісії.

Змінні n та m не дуже чітко визначені, оскільки пояснення для цих змінних були недостатніми для повного опису того, що мається на увазі під цими змінними. Результати розрахунків за цими рівняннями були завершені, але порівняння розрахункових результатів з фактичними результатами не було наведено, оскільки було зазначено, що не було жодних виміряних спостережень [103].

У 1982 році Courtney, Kost and Colinet завершили дослідження, яке визначило осадження пилу в повітропроводах підземних вугільних шахт [84]. Акцент в даній роботі ставився на визначенні оптимального графіка подачі гірничого пилу в підземну вугільну шахту за допомогою моделі осадження частинок у повітрі. Тестування було завершено у восьми місцях у п'яти підземних вугільних шахтах США. Модель осадження в цьому дослідженні була заснована на моделі, створеній Dawes and Slack в 1954 році. Їх модель базувалася на осадженні вугільного пилу в невеликій лабораторній аеродинамічній трубі. Отримана модель, яка має гаусівський характер, визначається наступним чином:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = Kc = Kc_0 e^{-\frac{Kx}{vH}}, \quad (2.4)$$

де $\frac{\partial m}{\partial t}$ – швидкість осадження пилу; x – відстань від джерела пилу; c_0, c – концентрація частинок пилу в повітрі діаметром D в джерелі та в точці x

відповідно; v – швидкість повітря; H – висота повітропроводу; K – константа, що характеризує швидкість осадження:

$$K = kD^2, k = \frac{(\rho - \sigma)g}{18\eta},$$

де D – діаметр частинки; ρ – густина частинки; σ – густина повітря; η – в'язкість повітря; g – прискорення вільного падіння.

Було встановлено, що ця модель дає задовільні результати для частинок діаметром менше 40 мкм, а експоненціальний спад з відстанню узгоджується з експериментальними результатами [84]. У дослідженні Courtney, Kost and Colinet також зазначено, що Bradshaw and Godbert завершили дослідження швидкості осадження пилу в рециркуляційних каналах підземних вугільних шахт. Результати цього дослідження показали експоненціальну швидкість осадження, але було виявлено, що перші 23 м від джерела мають в два-чотири рази більше осадження пилу, ніж було розраховано [84]. Досліджуючи осадження пилу в підземних вугільних шахтах, Онтін виявив, що швидкість осадження також зменшується за експоненціальним законом і що 50% пилу в повітрі осідає в межах 1,8 м від джерела [84]. Експериментальне тестування показало, що модель може недооцінювати швидкість осадження пилу на відстанях, близьких до джерел. В результаті тестування Courtney, Kost and Colinet виявили, що швидкість осадження в фунтах на квадратний фут на годину не залежала від розміру частинок у повітрі, але зростала зі збільшенням загальної концентрації пилу в повітрі. Рекомендована ними модель осадження, яка також ґрунтується на гауссовому законі, була наступною:

$$\frac{\partial m}{\partial t} = \left[\frac{K_1 V}{S} c_0 \right] e^{-Ax},$$

де $\frac{\partial m}{\partial t}$ – швидкість осадження пилу; K_1=15,6 – коефіцієнт пропорційності; $A=K_1/v$; x – відстань вздовж повітропроводу; c_0 – початкова концентрація пилу; v – швидкість повітря; V – об'єм повітропроводу; S – площа входу повітря.

Це рівняння можна використовувати, якщо потік повітря в повітропроводах є турбулентним, а не ламінарним, і якщо швидкість осадження має експоненціальну залежність від відстані [84]. Дослідження показало, що ця модель може бути використана для визначення оптимального графіка знепилювання породи для підземної вугільної шахти, але подальші випробування повинні бути завершені на багатьох інших шахтних майданчиках через варіабельність від місця розташування шахти до місця розташування [84].

Courtney, Cheng and Divers запропонували іншу модель осадження для підземних вугільних шахт у більш пізньому дослідженні [83]. У дослідженні стверджується, що «швидкість зниження концентрації пилу в повітрі дорівнює швидкості осідання частинок з повітря на поверхні поівтропроводів» [83]. Модель була розроблена з використанням ейлерового підходу, оскільки це твердження є аналогом закону збереження маси, і модель використовує стаціонарну опорну сітку. Модель представлена наступним рівнянням:

$$-vA\frac{\partial c}{\partial x} = L\frac{\partial m}{\partial t}, \tag{2.4}$$

де v – швидкість повітря; A – площа поперечного перерізу повітропроводу; c – локальна концентрація пилу; x – відстань вздовж повітропроводу; $\frac{\partial m}{\partial t}$ – швидкість осадження пилу на одиницю площі; L – площа осадження вздовж повітропроводу; K_1=15,6 – коефіцієнт пропорційності; $A=K_1/v$; c_0 – початкова концентрація пилу; V – об’єм повітропроводу; S – площа входу повітря.

Якби швидкість осадження пилу залежала від локальної концентрації пилу, як зазначено в дослідженні Courtney, Kost and Colinet, то рівняння (2.4) можна представити у вигляді:

$$-vA\frac{\partial c}{\partial x} = Lkc, \tag{2.5}$$

де k – константа швидкості осадження пилу,

$$\frac{c}{c_0} = e^{-\frac{L}{AV}kx}, \tag{2.6}$$

де c_0 – концентрація пилу в джерелі; c – концентрація пилу на відстані x від джерела.

Рівняння (2.5) продовжує використовувати підхід Ейлера, а рівняння (2.6) вводить гаусову компоненту в модель.

Експерименти з перевірки осадження пилу при різних швидкостях повітря і відносній вологості були проведені в підземній шахті з видобутку вапняку. Вважалося, що осадження може залежати від швидкості осадження Стокса. Однак було виявлено, що осадження залежало від швидкості повітря, при цьому великі і малі частинки осаджувалися з однаковою швидкістю протягом перших 300 футів від джерела в повітропроводі. Більші частинки повністю осідали на відстані 500 футів від джерела. Вважалося, що шорстка поверхня стін вапнякової шахти впливає на осадження дрібних частинок, затримуючи більші частинки. Залежність осадження частинок від швидкості повітря в повітропроводі означала зміну в розподілі частинок за розмірами в повітрі, яку ще треба було пояснити [83].

Результати дослідження показали, що на відстані 100 футів від джерела медіанний розмір частинок був вищим на дні повітропроводу (6,5 мкм), ніж у верхній частині повітропроводу (4,7 мкм). На відстані 500-700 футів від джерела медіанні діаметри були ближчими один до одного (4,5-4,9 мкм). Швидкість осадження пилу зменшується залежно від відстані від джерела. При низьких швидкостях повітря швидкість осадження була лінійною. При вищих швидкостях повітря швидкість осадження зменшувалася зі збільшенням відстані від джерела. Відносна вологість повітря мала незначний вплив на швидкість осадження пилу [83].

Також були представлені співвідношення швидкостей осадження пилу на підлогу, стіни та дах повітропроводу. Ці швидкості осадження залежали від розміру частинок і швидкість осадження на підлозі була більшою, ніж швидкість осадження на даху та стінах. Ці співвідношення були встановлені на основі досліджень, проведених Pereles та Owen [83].

Bhaskar and Ramani [61] описали метод моделювання осадження пилу, що вдихається, в підземній вугільній шахті. Їхня доповідь пов'язана з докторською дисертацією Bhaskar під назвою «Просторова і часова поведінка пилу в шахтах: Теоретичні та експериментальні дослідження», яку він захистив в Університеті штату Пенсильванія в 1987 році [60]. Використовуючи метод Ейлера, представлену математичну модель було записано так:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E_x\left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}\right) - u\frac{\partial c}{\partial x} + \text{source} - \text{sinks},$$

де c – концентрація пилу; t – час; E_x – коефіцієнт дисперсії; x – відстань від джерела пилу; u – швидкість повітряного потоку.

Термін «джерело» (source) означає пил, що утворюється під час роботи ріжучих механізмів у підземній шахті; термін «поглинач» (sinks) стосується осадження пилу на підлозі, стінах і даху повітропроводів [61]. Ця математична модель застосовується до всіх інтервалів розмірів частинок, які представлені в пиловій хмарі, що утворюється в результаті гірничих робіт.

Результати порівняння моделі з експериментами, проведеними в підземних повітропроводах, показали, що модель задовільно прогнозує осадження пилу в них. Модель мала тенденцію до кращого прогнозування при нижчих швидкостях повітря, ніж при вищих швидкостях. Крім того, загальний розмір пилу прогнозувався краще, ніж розмір пилу, що вдихається [60].

Детальні пояснення процесів, використаних при створенні цієї моделі, надають Ramani та Bhaskar [121]. Розглянуті процеси включають осадження частинок, осадження шляхом конвективної дифузії, осадження під дією сили тяжіння, коагуляції, механізмів зіткнення та повторного втягування [121]. Осадження частинок, пов'язане з масопереносом частинок до безпосередньої прилеглої поверхні, це осадження на даху і стінках дихальних шляхів і представлене броунівською дифузією, вихровою дифузією або седиментацією. Осадження шляхом конвективної дифузії відноситься до осадження, спричиненого вихорами в турбулентному потоці, і являє собою осадження на стінках. Осадження під дією сили тяжіння використовує гравітаційну швидкість

частинки для визначення осадження частинки на дно повітропроводу. Механізми коагуляції та зіткнення пов'язані між собою і базуються на взаємодії частинок одна з одною. Ці два процеси є важливими для визначення розподілу частинок за розмірами в повітрі, а отже, важливими для визначення кількості пилу, що осідає на поверхні повітропроводу. Вони враховують такі сили, як електростатичний заряд, сили Ван-дер-Ваальса і природу поверхонь частинок, що зіштовхуються. Повторне втягування оцінює кількість пилу, що утворюється з пилу, який вже був осаджений. Пил може бути повторно втягнутий через зсувні сили від швидкості повітря в повітропроводі, що перевищує силу зчеплення частинок на поверхні. Цей процес залежить від швидкості повітря [121].

Chiang і Peng [79] працювали над розробкою моделей розподілу пилу для підземних вугільних лав. У їхньому підході використовувався статистичний метод, який включає гаусову складову, для прогнозування концентрації пилу в різних місцях вздовж лави. Їхній звіт [79] описує сили, які впливають на частинку пилу, і є першим звітом про дослідження в галузі гірничої справи, що включає швидкості осадження в нерухомому повітрі. Дослідження також включало час зависання і відстань, яку пролітають частинки тих самих розмірів, коли швидкість повітря становить 2,5 м/с у виробці висотою 2 м.

У звіті Chiang і Peng описуються польові дослідження, проведені на кількох підземних вугільних шахтах, з метою визначення моделей повітряних потоків як у плані, так і в поперечному перерізі вздовж вибою лави. Як і в трубопроводі, максимальна швидкість повітряного потоку, як правило, знаходиться в центрі поперечного перерізу лави, але може зміщуватися в той чи інший бік залежно від розташування іншого обладнання (очисного комбайна, кріплення і конвеєра) в поперечному перерізі [79].

Була створена модель розподілу повітряного потоку, що призвела до наступного поліноміального рівняння [79]:

$$f_x\left(Y,Z\right)=A+BY+CZ+DY^2+EZ^2+FYZ\,,$$

де Y – горизонтальна вісь уздовж підлоги, що починається на вибої і спрямована до затвора; Z – вертикальна вісь вздовж вугільного вибою і спрямована до

покрівлі; *A, B, C, D, E і F* – це коефіцієнти, що представляють собою константи пропорційності, які були отримані в результаті регресійного аналізу виміряних значень швидкості в різних точках поперечного перерізу.

Модель повітряного потоку призвела до розробки моделі розсіювання пилу в довгому забої (лаві). Ця модель дисперсії використовує наступне рівняння для розрахунку середньозваженої за часом концентрації пилу на вході [79]:

$$\bar{N}(x) = \int_0^{20} \bar{N}(D,x)\,dt\,, \tag{2.7}$$

де

$$\bar{N}(D,x) = \frac{1}{T_c}\left[\begin{array}{l} \dfrac{1-e^{-MD^2x}}{MD^2}\left(\left(\dfrac{N_{01}(D)}{V_1}\right)+\left(\dfrac{N_{02}(D)}{V_2}\right)\right)+ \\ +N_c(D)(L-x)\left(\dfrac{1}{V_1}+\dfrac{1}{V_2}\right)+N_c(D)T_d \end{array}\right],$$

де $\bar{N}$ – середньозважена за часом концентрація в місці x; T_c – середній час повного циклу видобутку; D – розмір частинок; L – довжина, яку повинен подолати комбайн, щоб виконати один зріз; V_1, V_2 – швидкість зсуву, відповідно, від голови до хвоста та від хвоста до голови; T_d – середній час простою для повного циклу видобутку; $N_{01}(D)$ – функція гранулометричного складу джерела в поперечному перерізі відразу за очисним комбайном на зворотному боці для вхідного проходу від голови до хвоста; $N_{02}(D)$ – функція гранулометричного складу джерела в поперечному перерізі відразу за очисним комбайном на зворотному боці для проходу від хвоста до прохідного отвору; $N_c(D)$ – функція гранулометричного складу джерела в поперечному перерізі на стороні всмоктування комбайна (вважається постійною);

$$M = \frac{Apgm}{V_a u}\,,$$

де p – питома вага частинок пилу; g – прискорення вільного падіння; A – відношення периметра входу для ефективної вентиляції повітря; V_a – середня швидкість повітря; u – швидкість повітря;

Для того, щоб використовувати ці рівняння для розрахунку середньозваженої за часом концентрації пилу в певному місці, було зроблено чотири припущення [79]:

1. Вважається, що джерела пилоутворення в довгому забої (лаві) генерують пил з постійною швидкістю.

2. Очисний комбайн ріже вугілля в напрямку від голови до хвоста і очищає дно в напрямку від хвоста до голови. Під час очисного вибою кріплення завжди висувається вперед, а відстань між комбайном і кріпленням, що висувається, залишається незмінною протягом усього вибою.

3. Концентрація пилу вища на зворотному боці, ніж на впускному.

4. Швидкість руху комбайна постійна в обох напрямках.

Слід також зазначити, що межі інтегрування від 0 до 20 у рівнянні (2.7) представляють класи розмірів частинок від 0 до 20 мкм. Ця модель була протестована з даними польових досліджень, які були виконані для створення моделі розподілу повітряного потоку, і добре узгоджується з результатами польових досліджень [79]. Було виявлено, що швидкість повітря дуже важлива для розподілу частинок пилу. Збільшення вхідного повітряного потоку та утворення пилу від джерела на відповідні величини також збільшило концентрацію пилу на вході. Однак, збільшення пилоутворення від джерела на величину, яка вдвічі менша за величину збільшення вхідного потоку повітря, знижувало концентрацію пилу на вході [79]. Це свідчить про те, що усунення утворення пилу є дуже важливим для зменшення концентрації пилу. Зміни питомої ваги вугілля також були розглянуті за допомогою цієї моделі, і було виявлено, що значних змін у концентрації пилу не відбулося [79].

2.4 CFD моделювання

CFD (Computational Fluid Dynamics) моделювання – це метод дослідження, що поєднує в собі дві основні комп'ютерні технології [1-20, 22-36, 43-45, 55, 58, 62-72, 73-75, 86, 98, 107, 112, 113, 115, 119, 126, 128, 130-133, 136-138, 143, 145]:

1. Чисельне моделювання аеродинаміки повітряних потоків.
2. Чисельне моделювання процесів тепломасопереносу.

Як підкреслює видатний фахівець в галузі CFD моделювання Patric J. Roache, CFD моделювання «ближче до експериментальної, а не до теоретичної гідродинаміки», «проведення кожного окремого розрахунку на ЕОМ дуже схоже на проведення фізичного експерименту».

CFD моделювання базується (частіше всього) на методі Ейлера, що описує рух потоку рідини (повітря). Однак він також може включати метод Лагранжа. Метод Лагранжа застосовується до частинок, на які діють сили гравітації та повітряного потоку. Сили (гравітація і повітряний потік) базуються на ейлеровій системі, тоді як алгоритм Лагранжа використовується для опису процесів адвекції і дифузії, які відбуваються між окремими частинками і впливають на траєкторію кожної частинки [82].

Побудова та практична реалізація CFD моделей (обчислювальний експеримент, комп'ютерний експеримент) містить декілька кроків:

1. Формалізація процесу, що досліджується (визначення факторів, які будуть враховуватися при моделюванні: наприклад врахування турбулентної дифузії, теплопереносу тощо).
2. Визначення розмірності процесу, що досліджується (2D або 3D процес).
3. Схематизація (побудова) вигляду розрахункової області (рис. 2.12)
4. Побудова розрахункової сітки (рис. 2.13, 2.14).
5. Чисельний розв'язок аеродинамічної задачі (розрахунок поля швидкості повітряного потоку в області дослідження, рис. 2.15, 2.16, 2.17).

6. Чисельне рішення задач тепломасопереносу (розрахунок температурних полів, полів концентрації пилу тощо).

7. Аналіз результатів CFD моделювання.

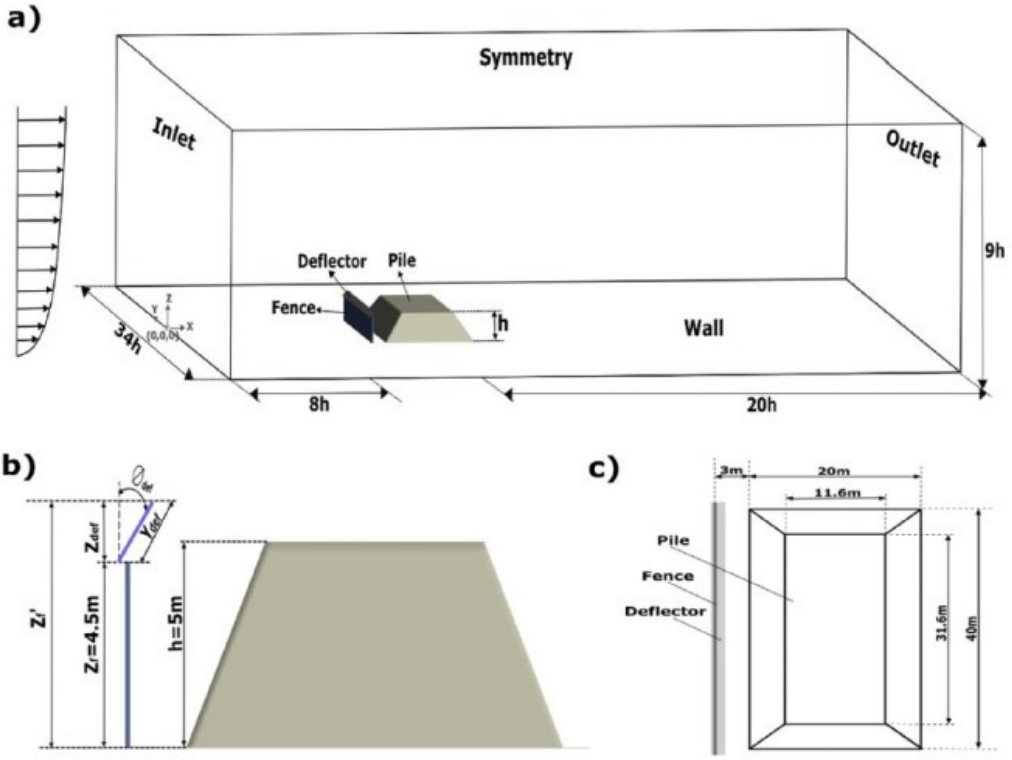


Рисунок 2.12 – Схема розрахункової області [88].

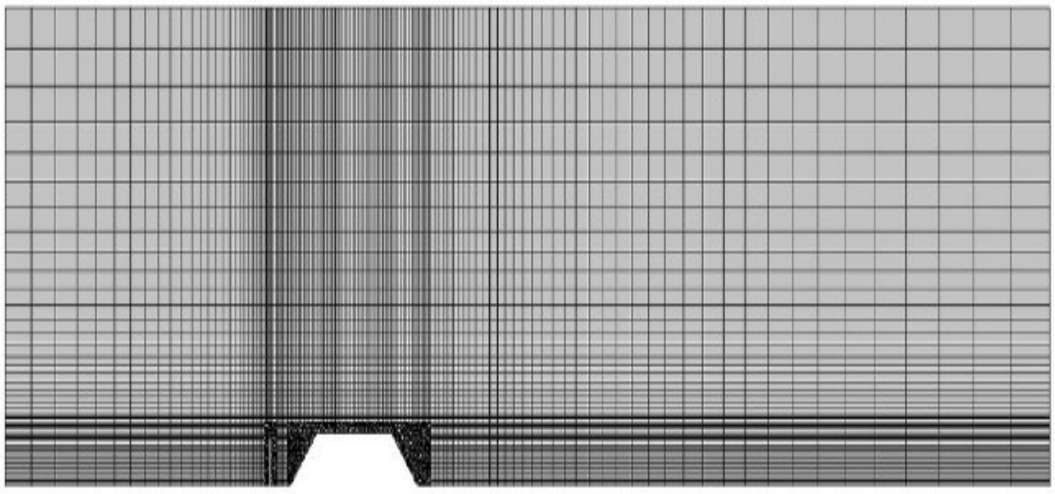


Рисунок 2.13 – Розрахункова сітка [88].

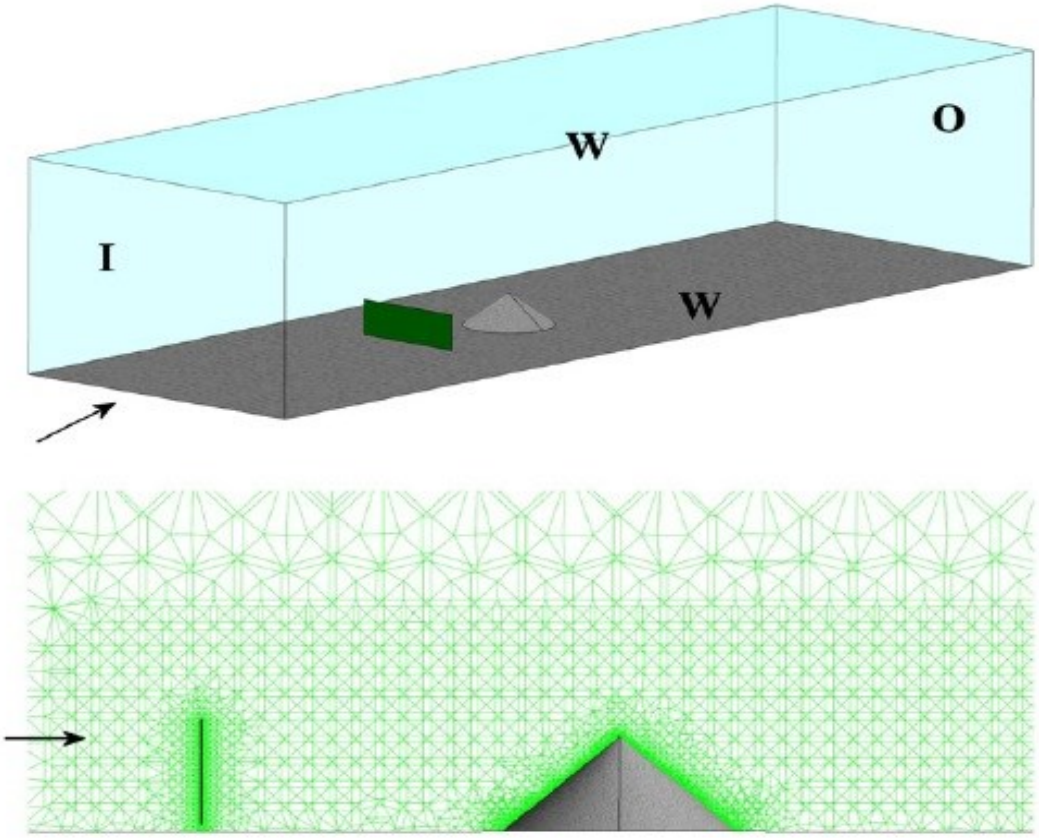


Рисунок 2.14 – Розрахункова область (CFD моделювання пилового забруднення повітря біля штабелю) [132].

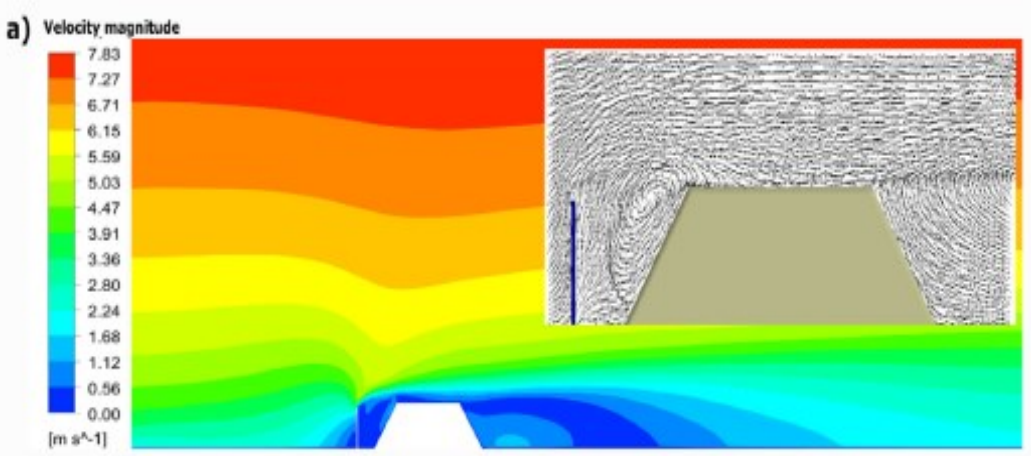


Рисунок 2.15 – Ізолінії швидкості повітряного потоку біля штабеля вугілля [88].

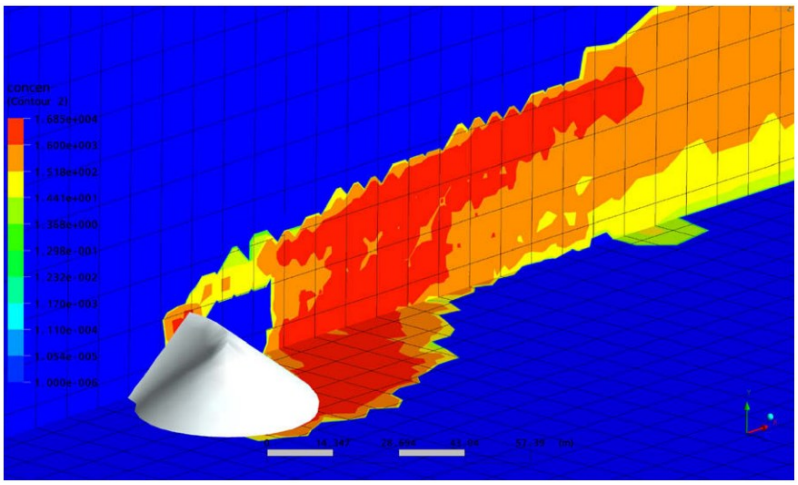


Рисунок 2.16 – CFD моделювання пилового забруднення повітря біля штабеля [89].

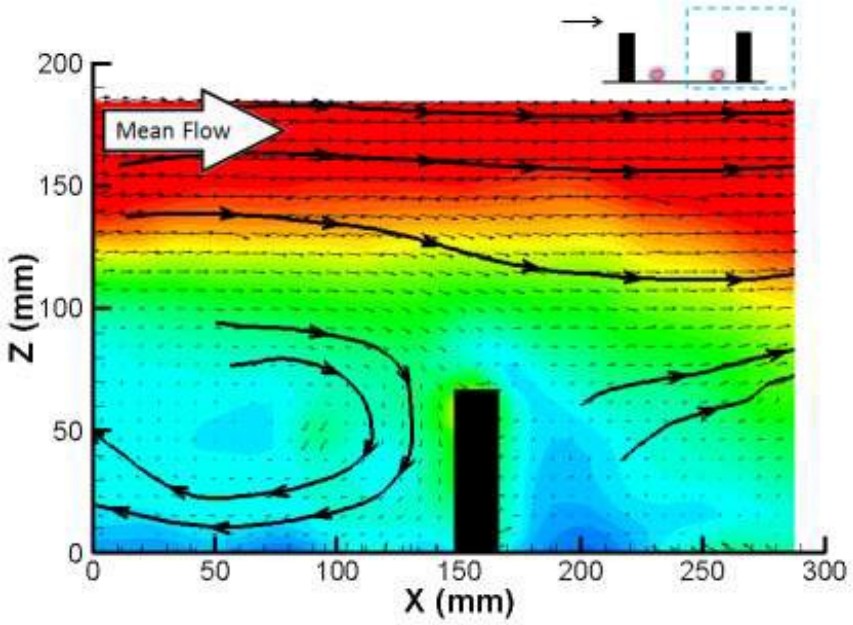


Рисунок 2.17 – CFD моделювання потоку біля захисного бар'єру [80].

Основою багатьох CFD моделей є рівняння руху потоку рідини (задача аеродинаміки), яке можна представити так:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i u_i)}{\partial x_i} = 0, \tag{2.8}$$

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \left(\lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right)}{\partial x_j} + \frac{\partial \left(\mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \right)}{\partial x_i} + \rho f, \tag{2.9}$$

$$\rho\frac{\partial e}{\partial t}+\rho u_k\frac{\partial e}{\partial x_k}=-p\frac{\partial u_k}{\partial x_k}+\frac{\partial\left(k\dfrac{\partial T}{\partial x_j}\right)}{\partial x_j}+\lambda\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)^2+\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_j}{\partial x_i}, \quad (2.10)$$

де ρ – густина рідини; t – час; x_i – i-а декартова координата ;u_i – компонента вектора швидкості в напрямку i-ї координати; p – тиск; μ – динамічна в'язкість; λ – об'ємна в'язкість; f_j – компонента сили в напрямку вісі x_j; e – внутрішня енергія рідини; k – теплопровідність рідини; T – температура.

Комп'ютеризований процес CFD замінює частинні похідні, показані в рівняннях (2.8)-(2.10), простішими дискретизованими алгебраїчними рівняннями, які використовуються для розв'язання значень потоку рідини в дискретних точках розрахункової області [138].

Було проведено кілька CFD моделювань на основі реальних підземних виробок безперервного видобутку корисних копалин. Комп'ютерна програма, яку використовували Wala та ін. для виконання CFD для дослідження повітряних потоків, була CFD2000 версії 2.2c. В результаті цих досліджень були отримані моделі повітряних потоків, які показують індивідуальні вектори швидкості повітряного потоку в підземних шахтних виробках і вентиляційних шахтах. Ці моделі були експериментально підтверджені за допомогою вимірювань тиску і швидкості [138] і нового методу вимірювання, який називається велосиметрія зображень частинок (PIV) [137]. PIV використовує цифрову камеру і джерело світла (зазвичай лазер) для отримання зображень рухомих частинок, що випускаються в повітряний потік через певні проміжки часу. Для розрахунку окремих дискретних векторів потоку загального повітряного потоку потрібно щонайменше два зображення. Цей метод вимірювання описаний в роботах Wala та ін. [137] і Turner та ін. [134]. PIV був оцінений за допомогою CFD, але він ще не був оцінений за допомогою експериментальних вимірювань тиску і швидкості в гірничих виробках [134].

Wala та ін. лише вказують на використання CFD на шахтних майданчиках для оцінки повітряних потоків. Однак вони згадують, що CFD можна

використовувати для диспергованого газу (наприклад, метану) і пилу, і наводять кілька посилань на дослідження, виконані на шахтних майданчиках, які оцінювали цю можливість CFD [138]. Додаткові дослідження були проведені Bennett та ін. [57, 58], які показують, що CFD має здатність прогнозувати концентрації забруднювачів повітря у виробничих приміщеннях. Хоча ці дослідження безпосередньо не пов'язані з гірничими роботами, вони підтверджують, що CFD можна використовувати для розповсюдження газу і пилу в підземних гірничих виробках.

Brunner та ін. [76] виконали комп'ютерне моделювання для оцінки використання CFD для розрахунку швидкості повітряного потоку, необхідної для запобігання зворотного руху диму від шахтної пожежі у вентиляційний потік [76]. Комп'ютерне моделювання було виконано на прикладі пожежі в гірничій машині, ширина якої становила 2,4 м, а висота – 2,7 м. Вхід у шахту мав ширину 4,0 м, висоту 4,5 м і довжину 200 м. Було виконано три сценарії швидкості вентиляційного потоку: 0,5 м/с, 0,75 м/с і 1,0 м/с. На відстані до 100 м від вентиляційного потоку зі швидкістю 0,5 м/с переважав зворотній рух диму. При швидкості повітряного потоку 0,75 м/с зворотній рух диму ще більше зменшувався, а при швидкості повітряного потоку 1,0 м/с він повністю зникав [76]. Ці результати не були підтверджені польовими дослідженнями.

Srinivasa та ін. [128] також виконали комп'ютерну симуляцію для моделювання швидкості повітряного потоку і розсіювання пилу в підземній виробці. Це моделювання проводилося на лаві і включало вплив комбайна і кріплення на повітряний потік. Частинки пилу вважалися безінерційними і не впливали на структуру повітряного потоку. Окремі вектори швидкості повітряного потоку були розраховані за допомогою FIDAP, програми CFD, створеної компанією Fluid Dynamics International (зараз доступна у Fluent, Inc.). Спочатку були розраховані моделі повітряних потоків, а потім окремо розраховані концентрації пилу за допомогою наступних рівнянь:

$$\rho^P \frac{\partial u_i^P}{\partial t} = F_D\left(u_i^F - u_i^P\right) + \left(\rho^P - \rho^F\right) g_i + \left(\rho^P - \rho^F\right) f_i,$$

де індекси *F* та *P* позначають рідку фазу (fluid) та частинки (particle) відповідно; ρ – густина; *t* – час; u_i – швидкість у напрямку *i*-ї координати; f_i – зовнішня сила; g_i – сила тяжіння;

$$F_D = 18\frac{\mu^F}{D_P^2}C_D,$$

де μ – динамічна в'язкість; C_D – коефіцієнт опору; *D* – діаметр частинки.

Рівняння траєкторії має вигляд:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = u_i^P.$$

Рівняння адвекції-дифузії для дисперсних частинок або забруднюючих речовин має вигляд [128]:

$$\rho\left(\frac{\partial c}{\partial t} + u_i c_j\right) = \left(\rho\alpha c_j\right)_j + Q,$$

де ρ – густина частинки; *t* – час; c_j – концентрація *j*-го забруднювача; α – масова дифузія; *Q* – інтенсивність джерела забруднення.

Моделювання проводилося на вибої лави, а результати порівнювалися з експериментальними даними. Швидкості повітряного потоку і концентрації пилу порівнювалися в поперечному перерізі входу, перпендикулярному до вибою лави [128]. Було проведено кілька моделювань для перевірки ефективності повітряної завіси, напівпрозорих завіс і скруберів з повітряним приводом у прохідницькому створі.

Моделювання, проведене для повітряної завіси, продемонструвало лише 15-20 % зниження концентрації пилу від зони високої концентрації до проходу секції лави, тільки якщо підтримувався об'єм повітряної завіси >0,05 м^3/с. Було зазначено, що витрата повітряного потоку >0,05 м^3/с для повітряної завіси не є практичною [128]. Результати моделювання повітряної завіси відповідають результатам дослідження, проведеного Hewitt у 1990 році [102].

Моделювання напівпрозорої завіси, встановленої вздовж розвантажувальної плити конвеєра, продемонструвало зниження концентрації

пилу від вибою до проходу на 25-30%. Не було зазначено, чи були ці результати перевірені експериментально [128].

Моделювання роботи скрубера з повітряним приводом показало, що на відстані 2,1 м нижче за течією ефективність захисту становила 40-50 %. Результати моделювання узгоджувались з експериментальними результатами в межах 10% [128]. Деталі експериментальної процедури не наводяться.

В результаті цього дослідження Srinivasa та ін. дійшли висновку, що CFD як інструмент для прогнозування розповсюдження пилу може бути використаний для модифікації та вдосконалення методів контролю за пиловим забрудненням.

Для аналізу концентраційних полів в робочих зонах, при використанні методу CFD моделювання, додатково здійснюється чисельне інтегрування рівняння переносу домішки. Дана процедура реалізується шляхом використання додаткових комп'ютерних кодів, що реалізують ту або іншу чисельну модель масопереносу. Якщо потрібно вирішити задачу про аналіз теплових полів в робочої зоні, то здійснюється рішення рівняння теплопровідності (при відсутності конвекції) або рівняння енергії. Також, окремо, визначається процес нагріву того або іншого об'єкту за рахунок випромінювання, що утворюється при наявності областей з високою температурою.

Слід зазначити, що в даний час існує декілька комерційних пакетів для проведення CFD моделювання, найбільш відомий – це пакет ANSYS. Існують також інші комерційні коди, наприклад, код «MITRAS», код «Comsol». Слід підкреслити, що основою рішення задачі аеродинаміки в комерційних кодах є система рівнянь Нав'є-Стокса. Слід підкреслити два особливо важливі аспекти при моделюванні поля швидкості потоку на базі рівнянь Нав'є-Стокса. Перший аспект – для чисельного рішення цих рівнянь потрібна дуже «дрібна» розрахункова сітка. Наприклад, лише в пограничному шарі використовують порядку 200 розрахункових точок у вертикальному напряму. Це ставить проблему перед інженером-проєктувальником, а саме – потрібен дуже потужний комп'ютер, що далеко не завжди є у інженера.

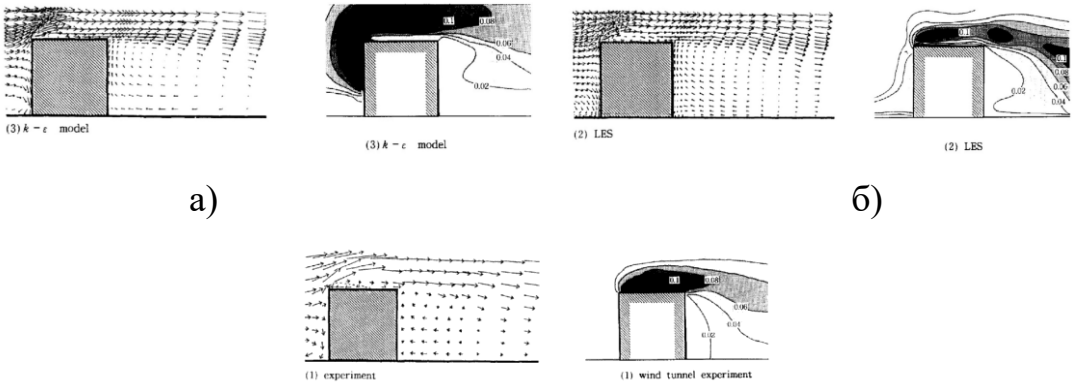
Тому, використання комерційних кодів, що реалізують чисельне моделювання на базі рівнянь Нав'є-Стокса ставить певні складнощі на практиці перед дослідником. Рішення задач на комп'ютері потребує значного часу (може бути декілька діб на розрахунок одного сценарію).

Другий аспект – при використанні рівнянь Нав'є-Стокса потрібно науково обґрунтувати вибір моделі турбулентності. Для моделювання турбулентної течії використовуються наступні моделі:

- k-ε модель;
- ARSM модель;
- LES модель;
- Spalart-Allmaras модель;
- DNS та інші.

При використанні тієї або іншої моделі турбулентності потрібно задавати певні емпіричні константи, значення яких визначено для вузького кола «спрощених» задач. Тому використання цих констант для рішення іншого класу задач потребує обґрунтування.

Використання різних моделей турбулентності може призвести до зовсім різних результатів комп'ютерного експерименту, ці результати можуть суттєво відрізнятися від фізичного експерименту. Так, на рис. 2.18 показано результати комп'ютерного експерименту при використанні найбільш поширених моделей турбулентності: k-ε та LES.



а) б)

в)

Рисунок 2.18 – Обтікання перешкоди : а- модель турбулентності к-е; б- модель турбулентності LES; в – експеримент [112].

Тому альтернативним підходом для рішення задачі аеродинаміки є використання моделі нев'язкої рідини. При використанні моделі нев'язкої рідини можливо рішення задачі аеродинаміки з урахуванням практично всіх важливих фізичних факторів: профілю швидкості вітру, наявності захисних бар'єрів на промисловому майданчику тощо. При цьому це займає лише кілька секунд. CFD моделі даного класу особливо ефективні на етапі проєктних робіт «фор-ескіз», коли потрібно зробити серію розрахунків за короткий термін часу та обґрунтувати найбільш раціональний захист повітря від забруднення.

Переваги CFD моделей:

1. Функціональні можливості моделей даного класу (врахування значної кількості фізичних факторів процесу, що досліджується, геометрії розрахункової області, врахування нестаціонарності процесів тощо) робить дані моделі особливо важливим інструментом в області наукових досліджень, що по своїм можливостям може, в ряді випадків, перевершувати фізичний експеримент; методи можуть буди використані для рішення задач, де проведення фізичного експерименту неможливо.

2. CFD моделі мають широкий робочий діапазон – це здатність проводити дослідження в областях, що мають розміри від декілька долей міліметрів до декількох кілометрів.

3. Використання CFD моделей потребує менше часу на проведення досліджень, крім цього, результати математичного моделювання представлені у вигляді, при якому відсутня необхідність додаткової обробки результатів з метою визначення необхідних закономірностей.

4. CFD моделі дають можливість аналізувати окремо вклад того або іншого параметра на процес, що досліджується, а це є практично неможливим при проведені фізичного експерименту.

5. CFD модель можна використовувати для вирішення «зворотних» задач.

6. CFD моделі дають можливість проведення комп'ютерного експерименту з різним ступенем точності.

В цілому, CFD моделі дають значну економію часу на проведення наукових досліджень.

Недоліки CFD моделей та комерційних кодів:

1. Проведення досліджень при використанні комерційного коду може бути лише при наявності ліцензії у користувача.

2. Користувач повинен пройти спеціалізоване навчання.

3. Комерційні коди «обмежені» конкретними граничними умовами, розміром розрахункової сітки. Це створює проблему – неможливість «втручатися» в комерційний пакет для налаштування його на інші параметри, інші граничні умови.

4. Комерційні коди мають значну вартість; може виникнути ситуація, коли комерційний код має «обмежений» термін дії, після завершення якого потрібно знову здійснювати оплату для подальшого використання коду.

5. Для практичної реалізації CFD моделей потрібні висококваліфіковані дослідники.

6. Розрахунок вимагає значних обчислювальних потужностей комп'ютерів і може тривати декілька діб, що не зовсім зручно при проведені серійних розрахунків.

Але, потрібно зазначити, що CFD моделювання є найбільш потужним інструментом в наукових дослідженнях в даний час. 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.

2.5 Моделі оцінювання ризику захворювання працівників

Оцінювання ризиків в задачах охорони праці є вкрай важливою задачею [37-41, 49, 50, 77, 81, 83, 93, 99]. Варто наголосити, що для практичних цілей оцінювання ефективності засобів зменшення запиленості повітря в робочих

зонах лише за розмірами зон забруднення на промислових майданчиках є недостатнім. Необхідно враховувати показник, що дозволяє безпосередньо визначити вплив забрудненого повітря на працівника під час використання конкретного засобу захисту. Для цього застосовуються різноманітні моделі оцінки ризиків. Наприклад, широко використовується 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).

Розрахунок за методикою US EPA здійснюється у наступному порядку:

1. Визначаються:

T – робочий час; R – об’єм повітря, що вдихається за годину (м^3/год); F – кількість робочих днів на рік; D – кількість років роботи; BW – вага людини.

2. Розраховується параметр AT:

$$AT=D\cdot F.$$

3. Розраховується концентрація пилу в робочий зоні C (в даній роботі концентрація в робочій зоні визначається на базі розроблених чисельних моделей масопереносу та аеродинаміки).

4. Визначається добова доза DD (Daily Doze):

$$DD=\frac{C\cdot R\cdot T\cdot F\cdot D}{BW\cdot AT}.$$

5. Розраховується референтивна доза RfD:

$$RfD=\frac{RfC\cdot IR}{BW},$$

де IR – витрата повітря при диханні (м^3/добу); RfC – референтивна концентрація (для $PM_{2.5}$=5 мг/м^3).

Варто зазначити, що показник RfD визначає концентрацію пилу, за якої не виникатиме загрози для здоров'я працівника.

Як видно з поданих залежностей, ця методика враховує низку важливих параметрів, які стосуються працівника: вагу, стать (параметри R, BW).

Для експрес оцінювання ризику для працівників використовується наступний параметр: відносний ризик *RR*:

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

де β=0.038 %; C – концентрація пилу в робочій зоні; C_0=5 мг/м^3 для $PM_{2.5.}$

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

$$HQ = \frac{C_R}{RfC},$$

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

Відносно розглянутих моделей потрібно відзначити один дуже важливий аспект – для ефективної оцінки ризиків при застосуванні різних засобів захисту повітря від забруднення необхідно володіти науково обґрунтованими даними щодо концентрації пилу в робочій зоні. Але визначення цієї концентрації – дуже складна задача, так як її значення залежить від багатьох факторів (наявність бар'єрів на промисловому майданчику, швидкість вітру, дифузія тощо). Саме для рішення цієї задачі в роботі розробляються чисельні моделі аеродинаміки та масопереносу. Розглянуті моделі оцінювання ризику захворювання у працівників інтегровані в розроблені чисельні моделі масопереносу у вигляді окремих підпрограм.

Висновки до розділу 2

1. Здійснено системний аналіз методів наукового дослідження, що використовуються при рішенні задач аеродинаміки, тепломасопереносу в галузі забруднення робочих зон на об'єктах гірничо-промислового комплексу.

2. Виявлено, що фізичний експеримент широко використовується в наукових дослідження, що проводяться для різних об’єктів гірничо-промислового комплексу та дає можливість визначати закономірності формування областей забруднення від різних джерел емісії пилу та небезпечних речовин. Але для проведення фізичного експерименту потребується значний час та кошти, що ускладнює проведення комплексних наукових досліджень.

3. Результати аналізу літературних джерел свідчать про те, що для рішення багатьох прикладних задач важливу роль відіграють 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 досліди процес при варіації різноманітних параметрів.

4. Проведений аналітичний аналіз літератури свідчить про те, що особливо важливим інструментом наукових досліджень в теперішний час є метод CFD моделювання; метод дає можливість аналізувати поля течії, концентраційні поля пилу в робочих зонах з детальною дискретизацію області дослідження.

5. Існують класи задач, де неможливо використовувати метод фізичного моделювання, тому метод CFD моделювання становиться основним методом наукового дослідження; важливою рисою методу CFD моделювання є значна економія часу та ресурсів при проведенні досліджень у порівнянні з методом фізичного моделювання.

6. Застосування комерційних кодів (наприклад, пакет ANSYS) потребує дуже висококваліфікованих працівників; комерційні пакети мають високу вартість та потребують використання потужних комп’ютерів, що не завжди наявні у користувача.

7. Для практичної реалізації комерційних пакетів потрібна детальна інформація про геометрію розрахункової області, про ті або інші фізичні параметри процесу, що моделюється; така інформація, на певних етапах проєктних робіт, не завжди доступна досліднику.

8. Існує певний дефіцит прикладних моделей, що дозволяють комплексно вирішувати задачі захисту працівників від пилового забруднення на об’єктах гірничо-добувного комплексу.

9. На основі вивчення літературних даних виявлено необхідність у створенні ефективних і економічних методів чисельного дослідження процесів пилового забруднення робочих зон на об’єктах гірничо-промислового комплексу.

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ПИЛОУТВОРЕННЯ ТА ЗАХОПЛЕННЯ КРАПЛЯМИ ВОДИ ЧАСТОК ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ

В галузі охорони праці вкрай важливою проблемою є визначення закономірностей пилоутворення на промислових майданчиках, де розташовуються штабелі вугілля, наявні забруднені поверхні майданчиків, так як винос пилу з таких поверхонь створює інтенсивне пилове забруднення повітря в робочих зонах. Процес пилоутворення залежить від декількох факторів, але до найбільш важливих факторів відносяться швидкість повітряного потоку над поверхнею вугілля та вологість вугілля. В даному розділі розглядаються результати експериментальних досліджень по визначенню закономірностей пилоутворення від ділянок, що забруднені вугільним пилом. Розроблена чисельна модель для прогнозування пилового забруднення повітря при різних метеорологічних умовах та при різній вологості вугілля.

В розділі також розглядаються результати експериментальних досліджень процесу «захоплення» краплею води часток вугільного пилу. Також розглянута побудова моделі для визначення ефективності знепилювання повітря шляхом подачі води в пилову хмару.

3.1 Опис експериментального обладнання

Локальна швидкість повітряного потоку біля поверхні вугілля є особливо важливим фактором, що впливає на інтенсивність пилоутворення. На рис. 3.1 схематично показано відрив часток пилу від поверхні вугілля. Тут потрібно вказати на три важливих етапи, що реалізуються при різному значенні локальної швидкості (в порядку зростання локальної швидкості):

Етап 1: рух часток по поверхні вугілля (creep).

Етап 2: рух часток пилу біля поверхні вугілля (saltation).

Етап 3: відокремлення частинок від поверхні вугілля (suspension) та їх перенесення потоком повітря.

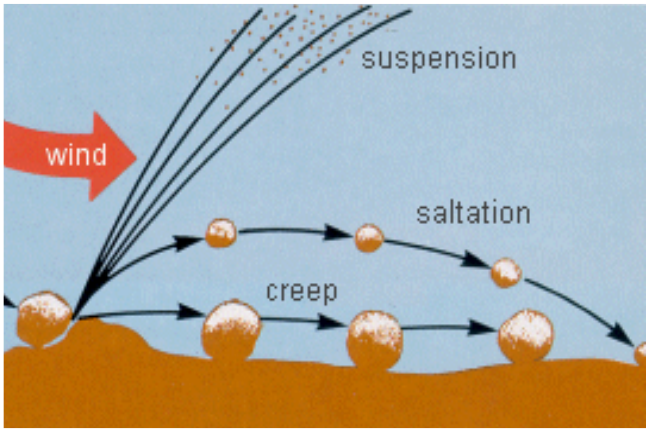


Рисунок 3.1 – Схема відокремлення частинок від поверхні вугілля [108].

Швидкість повітряного потоку , що відповідає етапу 3 має назву «порогова швидкість», «критична швидкість». Таким чином, для зменшення інтенсивності пилоутворення слід визначити порогову швидкість та проектувати захисні споруди так, щоб вони забезпечували локальну швидкість повітряного потоку біля поверхні вугілля меншу ніж порогова швидкість. Слід зазначити, що науково обґрунтоване значення порогової швидкості може бути отримано лише експериментальним шляхом, оскільки цей параметр суттєво залежить від конкретного вугілля. Для рішення цієї задачі був проведений комплекс лабораторних експериментів. Дослідження закономірностей пилоутворення та визначення значення порогової швидкості проводилися в лабораторії кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» УДУНТ.

Для проведення експериментальних досліджень використовувалося вугілля з Павлоградського району Дніпропетровської області (шахта Героїв Космосу, Україна). Експериментальна установка була розміщена на столі, а потік повітря забезпечувався за допомогою повітродувки (рис. 3.2).

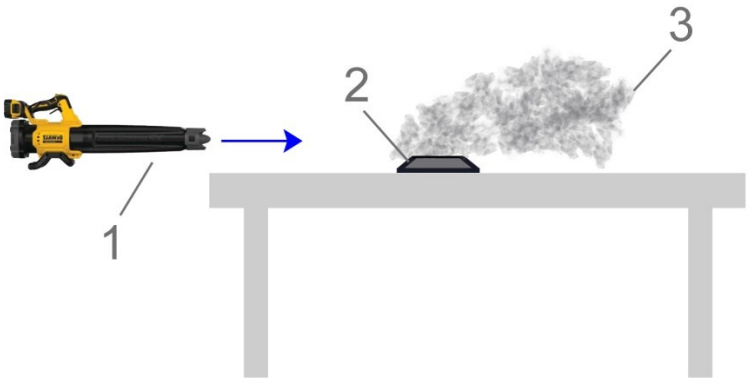


Рисунок 3.2 – Схема експериментальної установки:
1 – повітродувка; 2 – область розташування вугілля; 3 – пилова хмара.

Фото дослідної установки показана на рис. 3.3.

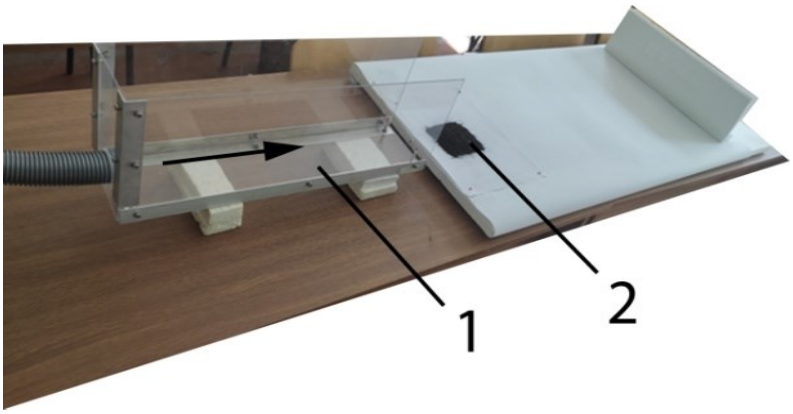


Рисунок 3.3 – Дослідна установка:
1 – повітряний короб від повітродувки; 2 – вугілля.

Вугілля розташовувалося в межах прямокутника (площинне джерело забруднення, модель майданчику), його розміри: 10см×10см, висота вугілля 0,5 см. Використовувалися фракції до 1 мм. Експеримент виконувався при температурі повітря 20 °С, вологість повітря 63 %. При проведенні експериментів, за критерій подібності приймалось число Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu},$$

де V – швидкість набігаючого потоку повітря, ν=15,7·10^{-6} м^2/с – кінематичний коефіцієнт в’язкості.

В якості лінійного масштабу L приймалася довжина моделі майданчику, тобто L=10 см.

Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовувався анемометр HT-9830 (рис. 3.4). Концентрація пилу $PM_{2.5}$ визначалась з використанням аналізатора якості повітря WP6910 (рис. 3.5). При проведені експерименту здійснювалася відеозйомка.



Рисунок 3.4 – Анемометр HT-9830.



Рисунок 3.5 – Вимірювач концентрації пилу WP6910.

Для проведення експерименту, попередньо, зразки вугільного пилу розміщувались у сушильній шафі моделі 2В-151 (рис. 3.6) протягом 1 год.



Рисунок 3.6 – Сушильна шафа 2В-151.

Метою цього дослідження є зменшення вологості вугільних зразків, щоб максимально наблизити умови експерименту до реальних умов зберігання вугілля на промислових майданчиках, де поверхня вугілля дуже швидко втрачає вологість під дією вітра та сонячних променів.

3.2 Дослідження інтенсивності пилоутворення вугільного пилу

При проведені експериментів використовувалися **фракції до 1 мм** (рис. 3.7)**.**



Рисунок 3.7 – Зразок вугільного пилу.

На першому етапі досліджень вимірювалася маса вугільного пилу, що виносилася з моделі майданчика за певний час (120 с). Далі здійснювався «збір» пилу, що був винесений з майданчику (рис. 3.8) та проводилося його зважування. Дана процедура повторювалася для різної швидкості набігаючого повітря.

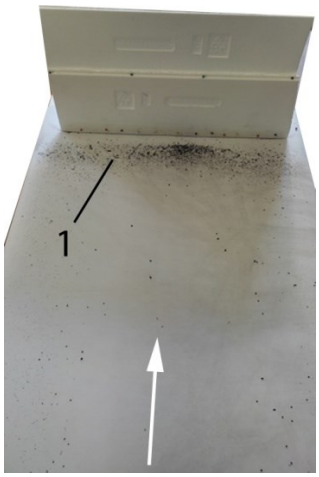


Рисунок 3.8 – Вугільний пил, що був винесений з моделі майданчика:
1 – область забруднення.

Аналіз даних, що наведені на рис. 3.8 показу, шо найбільш інтенсивно пил виноситься вздовж осі моделі майданчику, тобто вздовж осі струменя потоку («чорна» зона біля загороджуючої стінки, рис. 3.8). Область забруднення з боків має менш насичений колір, що свідчить про менший винос пилу з боків майданчику та вплив процесу дифузії на розповсюдження домішки.

Аналіз візуального спостереження за процесом пилоутворення та аналіз відеозапису експерименту показали, шо різним етапам руху часток пилу відповідають такі значення швидкості повітряного потоку:

Етап 1: рух часток по поверхні вугілля (creep) починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=2.5÷2.9 м/с.

Етап 2: рух часток пилу біля поверхні вугілля (saltation) починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=3.3÷3.6 м/с.

Етап 3: відокремлення частинок від поверхні вугілля (suspension) та їх перенесення потоком повітря починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=4.1÷4.5 м/с.

Таким чином, 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÷4.5 м/с.

Результати обробки вимірювань маси пилу, що «винесена» від моделі майданчику, показано на рис. 3.9. На цьому рисунку наведено залежність інтенсивність пилоутворення при різній швидкості набігаючого потоку повітря. Так як вимірювання здійснювалися при турбулентному режимі, то анемометр показував певний діапазон швидкості повітряного потоку. При обробці даних розраховувалось середнє значення швидкості повітряного потоку, що наведено на рис. 3.9.

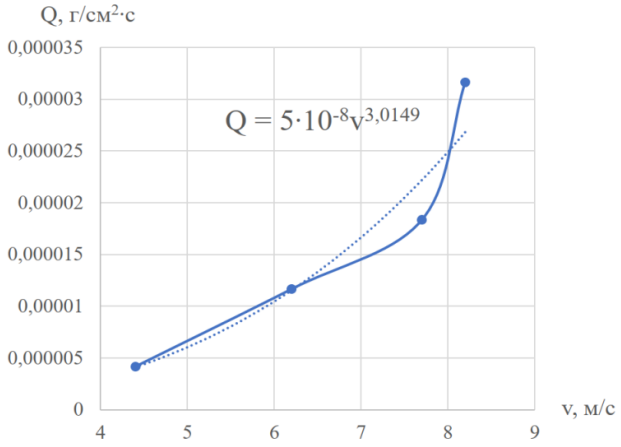


Рисунок 3.9 – Інтенсивність пилоутворення при різній швидкості повітряного потоку.

Дані на рис. 3.9 показано, що пилоутворення різко зростає при швидкості повітряного потоку більше 7 м/с.

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

$$Q = 5 \cdot 10^{-8} \cdot V^{3.0149}, \frac{г}{с \cdot см^2} \qquad (3.1)$$

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

Емпіричну модель (3.1) можна використовувати при проведенні досліджень методом чисельного моделювання для прогнозування рівня запиленості у робочих зонах на промислових майданчиках.

На другому етапі досліджень вимірювалася концентрація пилу $PM_{2.5}$ на висоті 10см (це відповідає характерному масштабу моделі L=10 см) та різній відстані від площинного джерела пилового забруднення. Вимірювання здійснювалось також при різній швидкості набігаючого повітряного потоку. Так як вимірювання здійснювалось при турбулентному режимі, то детектор концентрації пилу показував певний діапазон вимірюваної величини. При обробці даних розраховувалось середнє значення концентрації пилу з діапазону, що показував детектор.

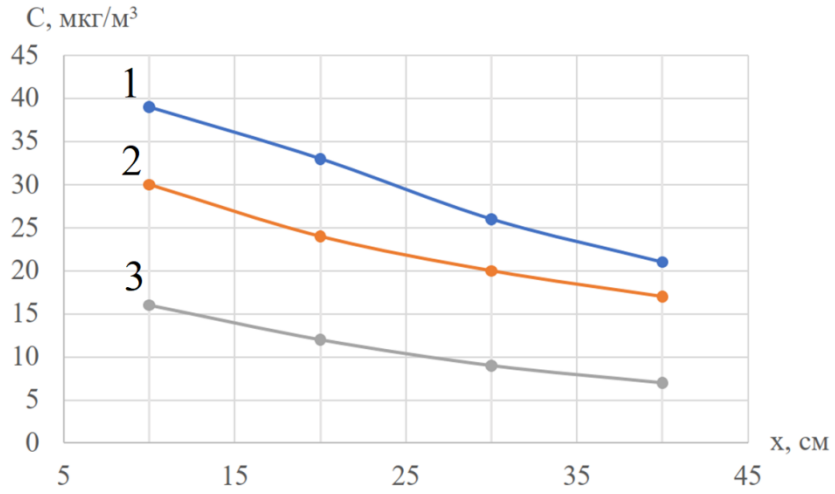


Рисунок 3.10 – Концентрація пилу ($PM_{2.5}$) на різній відстані від області пилоутворення: 1 – V=8.2 м/с; 2 – V=7.7 м/с; 3 – V=4.5 м/с.

Як можна бачити з рис. 3.10, концентрація пилу зменшується практично в 2 рази на відстані 4*L* від джерела забруднення. Це можна пояснити гравітаційним осадженням часток вугільного пилу. Слід також звернути увагу на те, що за швидкості повітряного потоку *V*=4.5 м/с, що відповідає значенню порогової швидкості, все одно за майданчиком формується область пилового забруднення.

3.3 Дослідження зміни вологості вугілля при різній швидкості повітряного потоку

Зволожування поверхні вугільного штабелю широко використовується в світі для зменшення пилоутворення (рис. 3.11).



Рисунок 3.11 – Зволожування поверхні штабелю вугілля.

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 організовувати подачу води на штабель.

Перед проведенням досліджень по визначенню зміни вологості вугільного пилу при обдуванні майданчику вітром, що має різну швидкість, зразки

вугільного пилу знаходилися у сушильній шафі при температурі +40 °С протягом 1 год. Після цього проводилось зважування зразку вугілля, потім в зразок додавалась вода в кількісті, необхідній для отримання потрібного значення вологості зразка. Вологість зразка визначалася так:

$$P = \frac{M_{вл} - M_c}{M_c} 100\%, \qquad (3.2)$$

де P – вологість, %; M_c – маса сухого зразка; $M_{вл}$ – маса вологого зразка.

Далі зразок розташовувався на експериментальному майданчику (рис. 3.2), здійснювалась продувка його протягом 2 хв, після чого зразок зважувався, визначалась остаточна вологість та експеримент з даним зразком продовжувався.

Так як вимірювання здійснювалися при турбулентному режимі, то анемометр показував певний діапазон швидкості повітряного потоку. При обробці даних, для побудови графічної залежності, розраховувалось середнє значення швидкості повітряного потоку. Початкова вологість зразка вугілля була 10 %. Здійснювалась відеозйомка експерименту.

Після обробки даних вимірювань була побудована графічна залежність зміни вологості зразка вугілля з часом при різній швидкості повітряного потоку (рис. 3.12).

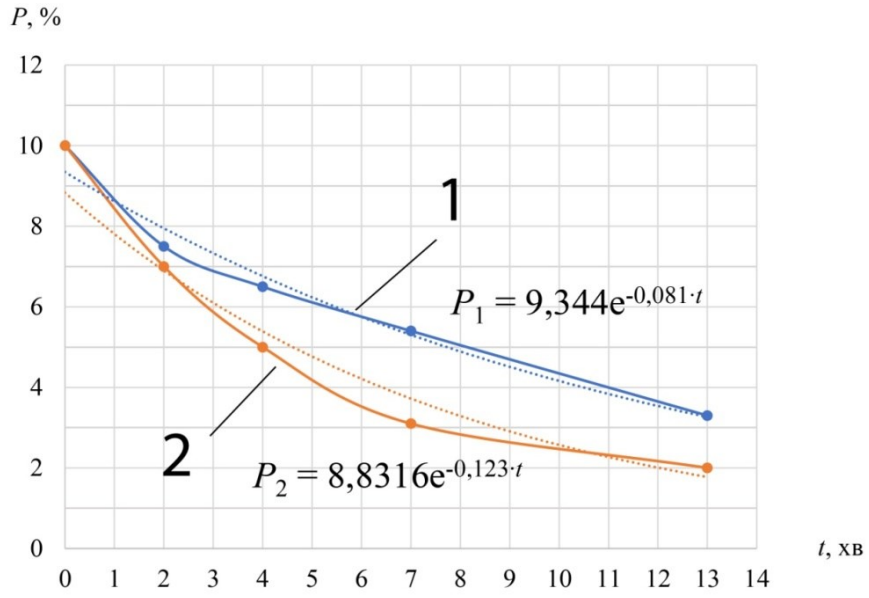


Рисунок 3.12 – Зміна вологості вугілля з часом:1 – швидкість повітряного потоку 4.6 м/с; 2 – швидкість повітряного потоку 7.1 м/с.

Аналіз даних на рис. 3.12 показує таку закономірність: зниження вологості йде швидко протягом перших 7–8 хв; за цей проміжок часу вологість зменшується в 2 рази, якщо швидкість повітряного потоку 4.6 м/с та в 3 рази, якщо швидкість повітряного потоку 7.1 м/с.

Також можна побачити, що на цьому проміжку часу, для V=4.6 м/с, швидкість «падіння вологості» менше ніж для швидкості повітряного потоку V=7.1 м/с:

$$gradP = \frac{5\% - 10\%}{8} = -0.625\ \%/_{хв} \text{ для } V = 4.6 \text{ м/с}$$

$$gradP = \frac{2.9\% - 10\%}{8} = -0.887\ \%/_{хв} \text{ для } V = 7.1 \text{ м/с}$$

Обробка експериментальних даних дає можливість отримати такі емпіричні моделі для експрес оцінювання зміни вологості вугілля з часом при різній швидкості повітряного потоку:

$$P_{4.6} = 9.344 \cdot e^{-0.081t}, \tag{3.3}$$

$$P_{7.1} = 8.831 \cdot e^{-0.123t} \tag{3.4}$$

Використовуючи емпіричні моделі (3.3) та (3.4), об’єднавши їх (враховуючи округлення), можна отримати емпіричну модель:

$$P = 9 \cdot e^{-0.1t} \tag{3.5}$$

Таким чином, за допомогою моделі (3.5) можна швидко визначати час, коли вологість вугілля зменшиться та досягне межі 3%. При такій вологості починається процес пилоутворення, тому слід повторити змочування поверхні вугілля.

Візуальний аналіз експерименту та аналіз відеозйомки експерименту дозволили визначити таку закономірність пилоутворення:

- при вологості порядку 5 % починається рух часток пилу біля поверхні вугілля, якщо швидкість повітряного потоку порядку 7.1 м/с;

- при вологості порядку 3 % починається активний винос часток вугільного пилу повітряним потоком, якщо швидкість повітряного потоку порядку 7.1 м/с;

- при вологості порядку 3 % починається рух часток пилу біля поверхні вугілля, якщо швидкість повітряного потоку порядку 4.6 м/с;

- при вологості порядку 2 % починається активний винос часток вугільного пилу повітряним потоком, якщо швидкість повітряного потоку порядку 4.6 м/с;

Різниця в значенні вологості – 2 % (швидкість повітряного потоку 4.6 м/с) та 3 % (швидкість повітряного потоку 7.1 м/с), при якій починається активний винос часток вугільного пилу, – можна пояснити тим, що при малій швидкості повітря кінетичної енергії потоку не вистачає для «відриву» часток пилу від поверхні вугілля.

Таким чином, 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.

На другому етапі досліджень визначалась інтенсивність виносу часток вугільного пилу від одиниці площі забрудненої ділянки при різній вологості зразка вугілля. Для моделювання цього процесу штучно створювалася область забруднення, що мала певну вологість: 5 %; 10 %; 20 %. Продувка мала місце на протягом 60 с при різній швидкості повітряного потоку. Після цього, шляхом вимірювання на вагах, визначалася маса пилу, що була «здута» з поверхні за даний час. Далі здійснювався розрахунок інтенсивності емісії пилу від одиничної площини ділянки, при обраній швидкості повітряного потоку:

$$Q_i = \frac{M_i}{tS}, \tag{3.6}$$

де M_i – маса вугільного пилу, що була здута з ділянки за час t при швидкості повітря v_i, гр/(см^2·с); t – час, с; S – площа поверхні, см^2.

Нижче в таблицях наведено значення інтенсивності виносу пилу від ділянки при різній вологості зразка та різній швидкості повітряного потоку. Швидкість потоку – це середнє значення (максимум та мінімум) показника анемометру НТ-9830.

Таблиця 3.1 – Інтенсивність виносу пилу від ділянки при різній швидкості повітряного потоку (вологість зразка 5 %)

Швидкість, м/с	Інтенсивність виносу пилу, г/(см^2·с)
5.4	0.000003
6.6	0.000007
7.3	0.000012

Таблиця 3.2 – Інтенсивність виносу пилу від ділянки при різній швидкості повітряного потоку (вологість зразка 10 %)

Швидкість, м/с	Інтенсивність виносу пилу, г/(см^2·с)
5.6	0.000001
6.8	0.000003
7.7	0.000008

При вологості зразка 20 % не було помічено виносу пилу від забрудненої ділянки.

Дані, наведені в таблицях, показують, що вологість вугілля різко зменшує інтенсивність пилоутворення. Але випаровування води призведе до зменшення вологості та збільшення виносу пилу.

3.4 Визначення інтенсивності інфільтрації води у вугільну масу

Для зменшення пилоутворення з поверхні вугілля використовують воду та різні спеціальні розчини. Якщо здійснюється подача води на поверхню вугілля (наприклад, штабель вугілля, вугільний пил на поверхні промислового майданчика), то швидкість (інтенсивність) подачі води Q на поверхню вугілля визначається так:

$$Q = \frac{Q_w}{S}, \text{ м/с,}$$

де S – площа змочування м^2, Q_w – витрата води, м^3/с.

Слід зазначити дуже важливий аспект, а саме, параметр Q не повинен бути більшим ніж коефіцієнт фільтрації, тобто:

$$k > Q \tag{3.7}$$

де k – коефіцієнт фільтрації.

Якщо умова (3.7) не виконується, то на поверхні вугілля буде формуватися шар води, та при наявності ухилу поверхні буде формуватися поверхневий стік.

Нижче наведено результати експериментальних досліджень по оцінці інтенсивності інфільтрації води вглиб вугілля при зрошуванні з різною інтенсивністю подачі води. Вугілля було розташовано в мірній ємності, на поверхню якого здійснювалась подача води (рис. 3.13).

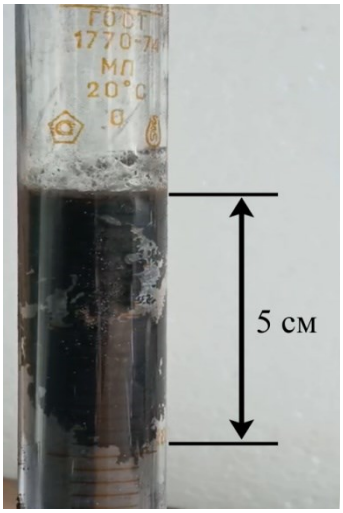


Рисунок 3.13 – Область інфільтрації води після зрошування.

Експериментальним шляхом встановлено, що при швидкості подачі води (параметр Q) 0,7-0,8 см/с не буде формуватися шар води на зрошуваній поверхні. При витраті води на поверхню вугілля зі швидкістю подачі порядку 0,9 см/с починається формування невеликого шару води на зрошуваній поверхні висотою порядку 2 мм. При швидкості подачі води на поверхню вугілля порядку 1 см/с та

більше починається інтенсивне формування шару води на зрошуваній поверхні. Таким чином, рекомендована витрата води на поверхню вугілля буде порядку Q =0,008 м^3/с. Для практичних розрахунків можна прийняти, що коефіцієнт фільтрації k зразка вугілля дорівнює величині порядку 0,8 см/с.

Далі було проведено розрахунки на базі отриманих експериментальних даних по визначенню пористості вугілля. Для цього було виконано вимірювання глибини промочування вугілля h_{filtr} після інфільтрації води в кількості W_{in}=5 см^3. Було отримано таке значення: h_{filtr}=13 см. Вода ввібралась за 45 с. Такому значенню h_{filtr} відповідає наступний об'єм вугілля;

$$W_{coal} = S \cdot h_{filtr},$$

де S=0.785·d^2, d=2 см – діаметр мірної ємності.

Таким чином, орієнтовне значення пористості вугілля розрахувалася так:

$$\varepsilon_0 = \frac{W_{\text{in}}}{W_{coal}} = 0{,}12 .$$

Таким чином, експериментальним шляхом встановлені важливі параметри: пористість вугілля та рекомендована швидкість подачі води на поверхню вугілля.

Далі було побудовано чисельну модель для розрахунку динаміки змочування вугілля при різній витрати Q води (або спеціального розчину) на поверхню вугілля (рис. 3.14).

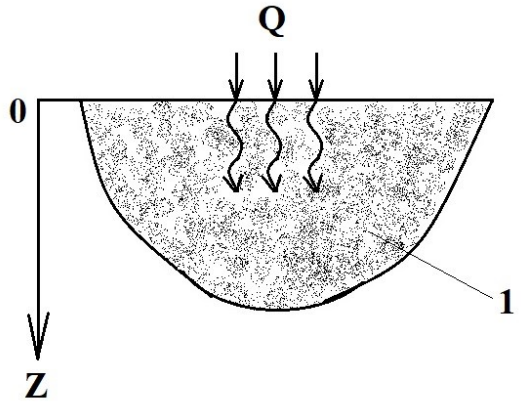


Рисунок 3.14 – Схема інфільтрації води при зрошуванні.

Для визначення глибини промочування вугілля з часом при зрошуванні з витратою Q використовується моделююче рівняння:

$$\mu \frac{dz}{dt} = k \frac{Q(t) \cdot t + (1-\mu) z}{z}, \tag{3.8}$$

де μ – нестача насичення; z – глибина промочування вугілля; k – коефіцієнт фільтрації; t –час.

Для рівняння (3.8) ставиться крайова умова: $z = z_0$ при $t=0$.

Відмінність моделюючого рівняння від рівняння, що запропоновано Полубаріновою–Кочиною, полягає в тому, що в рівнянні (3.8) враховується залежність Q від часу витрати на поверхню вугілля.

Далі будується чисельна модель інфільтрації води вглиб вугілля шляхом використання метода Ейлера для чисельного інтегрування рівняння (3.8). Чисельна модель має вигляд:

$$z_i^{n+1} = z_i^n + \frac{\Delta t \cdot k}{\mu} \cdot \frac{Q(t) \cdot t + (1-\mu) \cdot z_i^n}{z_i^n} \tag{3.9}$$

Здійснена програмна реалізація чисельної моделі (3.9), розроблено код ZFILT. Для програмування використовувався FORTRAN. Для реалізації чисельної моделі (використання коду) потрібно задати:

1) витрату води (спеціального розчину) на поверхню вугілля;

2) нестачу насичення;

3) коефіцієнт фільтрації;

4) розрахунковий крок за часом.

Результат розрахунку – динаміка зміни з часом глибини промочування вугілля.

Далі наведено результати обчислювального експерименту по визначенню глибини промочування вугілля при зрошуванні його поверхі при наступних даних:

- нестача насичення 0,12;

- коефіцієнт фільтрації 0,7 см/с;

- розрахунковий крок за часом Δt=0,01 с.

Для реалізації розрахунку по розробленій чисельної моделі потрібно задати початкову глибину: приймалося, що початкова глибина z=0.001 см для моменту часу t=0 с.

Швидкість подачі (витрата на 1 м^2) води на поверхню вугілля була:

- Сценарій № 1: витрата 0,3 см/с.

- Сценарій № 2: до моменту часу t=10 с швидкість подачі води на поверхню вугілля становила 0,3 см/с, далі витрата збільшувалась до 0,5 см/с.

Результати розрахунку наведено далі на рисунках. На рис. 3.15 показано динаміку області змочування для першого сценарію.

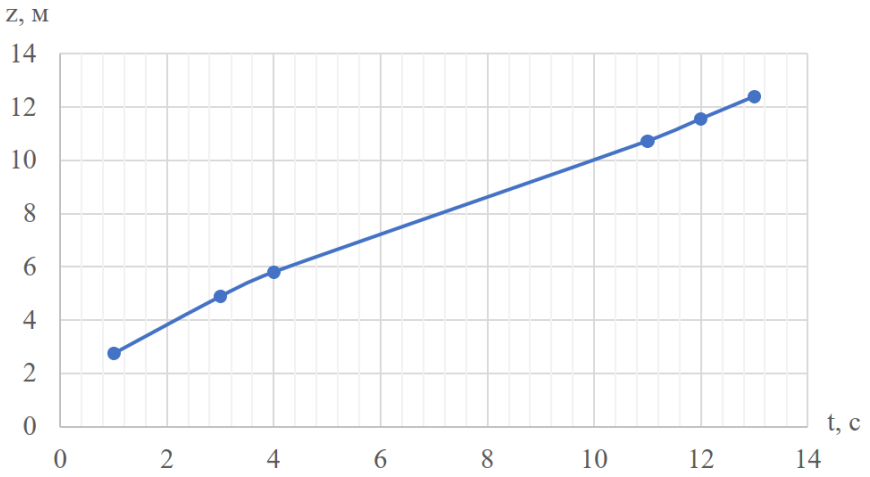


Рисунок 3.15 – Динаміка області змочування для Сценарію №1.

На рис. 3.16 показано динаміку області змочування для другого сценарію.

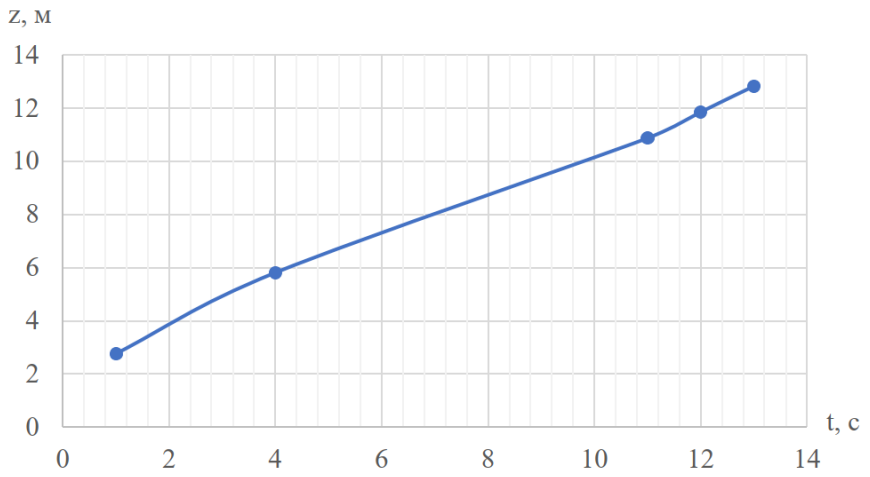


Рисунок 3.16 – Динаміка області змочування для Сценарію №2.

Аналіз даних, що приведені на рис. 3.15 та рис. 3.16, показують, що модель «реагує» на «незначну» зміну в швидкості подачі води на поверхню вугілля: з рис. 3.16 можна бачити, що після моменту часу t=10 с глибина змочування більше ніж для Сценарію № 1.

Таким чином, розроблена чисельна модель інфільтрації води в вугілля дає можливість визначити глибину області промочування в залежності від часу зрошування та інтенсивності зрошування. Це є важливим для організації раціонального зрошування поверхі вугілля з метою зменшення пилоутворення.

3.5 Визначення інтенсивності випаровування води зі змочуваної поверхні вугілля

Розглянемо експрес метод визначення часу, коли потрібно проводити змочування вугілля з метою зменшення пилоутворення. При проведені експериментів використовувалися фракції до 1 мм.

За допомогою моделі (3.5) можна визначити час, коли вологість вугілля зменшиться до 3%, при якій починається процес пилоутворення та слід повторити змочування поверхні вугілля.

Для використання побудованої моделі (3.5) слід визначити «початкову» (після зволоження) вологість вугілля. Така вологість може бути розрахована наступним чином:

1. Визначається маса води *dm*, що подана на поверхню вугілля за період змочування *dt*:

$$dm = Q \cdot \rho_w \cdot dt ,$$

де Q – витрата води на поверхню вугілля; ρ_w – густина води; dt – проміжок часу, протягом якого здійснювалося змочування.

2. Визначається об’єм води:

$$W_w = \frac{dm}{\rho_w}.$$

3. Визначається об’єм вугілля, що «вбере» масу води:

$$W_{coal} = \frac{W_w}{n_0},$$

де n_0 – об’ємна пористість вугілля.

4. Визначається маса вугілля в цьому об’ємі:

$$dm_{coal} = W_{coal} \cdot \rho_{coal},$$

де ρ_{coal} – густина вугілля.

5. Визначається «початкова» вологість вугілля після завершення зрошування:

$$P_0 = \frac{W_w}{W_{coal}}.$$

6. Далі, використовуючи емпіричну модель (3.5), визначається час, коли вологість P ділянки зменшиться до 3 %, тобто час, коли потрібно знову проводити змочування поверхні вугілля.

Варто зазначити, що ця модель може бути застосована на етапі «фор-прогноз» для визначення графіку подачі води на поверхню вугілля.

Здійснено програмну реалізацію розробленого метода експрес розрахунку зміни вологості вугілля з часом. Створено підпрограма AMOI, мова програмування FORTRAN. Дана підпрограма інтегрована в програмний комплекс «WCoal». Даний програмний комплекс та його модулі будуть розглянути далі.

Для використання підпрограми AMOI потрібно задати:

- час, на протязі якого було змочування поверхні вугілля;
- об’ємну пористість вугілля;
- витрату води, що подається на поверхню вугілля;
- площу змочування;
- густину вугілля;

Результатом роботи підпрограми AMOI є значення вологості вугілля для різних моментів часу після припинення зрошування поверхні вугілля.

Розглянемо також інший підхід до визначення швидкості випаровування води зі зволоженого вугілля. Так, після зрошування, в шарі вугілля можна виділити дві зони: зона 1 (глибина h_a), де вже відсутня волога внаслідок випаровування води, та зона 2 (глибина h_w), де ще знаходиться вода після зрошення (рис. 3.17).

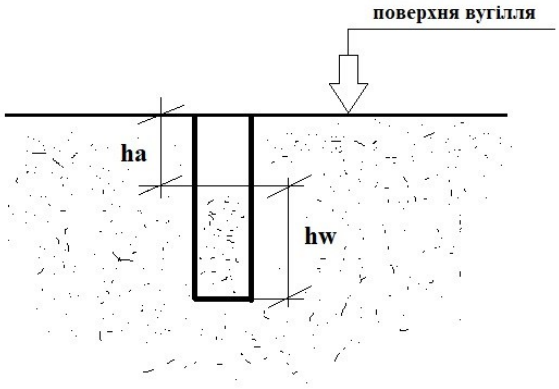


Рисунок 3.17 – Зона зволоження вугілля.

Припустимо, що процес випаровування води на межі поділу цих зон відбувається аналогічно випаровуванню з «вільної» поверхні. Тоді швидкість випаровування визначається так (Frank Kreith, William Z. Black):

$$Q = h_m S\left(C_S - C_\infty\right), \tag{3.10}$$

де C_S – концентрація водяної пари біля вільної поверхні; C_∞ – концентрація водяної пари в повітрі біля межі випаровування; S – площа вільної поверхні; h_m – коефіцієнт конвективного масообміну.

Відзначимо, що залежність (3.10) показує, що інтенсивність випаровування залежить від концентрації C_∞ водяної пари в повітрі біля межі випаровування. Але ця концентрація є змінною внаслідок руху повітряного потоку. Таким чином, інтенсивність випаровування буде різна над різними ділянками вугілля. Це буде враховано в чисельної моделі, що розглядається далі.

Коефіцієнт h_m можна обчислити так:

$$h_m = \frac{Sh \cdot \mu}{L}, \, м/с \qquad (3.11)$$

де L – характерний лінійний розмір; Sh – число Шервуда; μ – коефіцієнт дифузії.

Число Шервуда обчислимо за формулою:

$$Sh = 0.036 \cdot Sc^{1/3} \cdot \mathrm{Re}^{0.8},$$

де Re – число Рейнольдса; $Sc = \frac{\nu}{\mu}$ – число Шмідта; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості; μ – коефіцієнт дифузії.

Дана математична модель інтегрована в чисельну модель масопереносу водяної пари в повітрі, тому при практичній реалізації моделі (3.10) за характерний лінійний масштаб використовується значення довжини різницевої комірки. При побудові чисельної моделі випаровування води з поверхні вугілля в залежності (3.10) буде використовуватися концентрація водяної пари в повітрі біля вільної поверхні.

Розглянемо метод визначення вологості вугілля після зрошування на базі розглянутих рівнянь. Слід звернути увагу на те, що швидкість повітряного потоку біля поверхні штабелю вугілля різна в різних частинах об'єкту. Але різна швидкість повітряного потоку біля поверхні вугілля призводить до різного значення концентрації водяної пари в повітрі біля поверхні випаровування, а значить до різної інтенсивності випаровування Q. На рис. 3.18 умовно показано три ділянки з різним напрямком руху повітряного потоку та різною швидкістю V_i (по модулю) повітряного потоку.

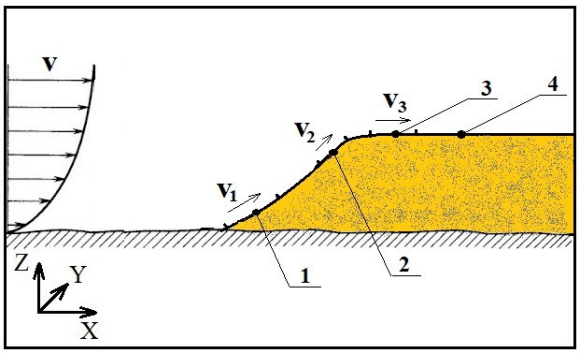


Рисунок 3.18 – Розрахункова схема: 1, 2, 3 – розрахункові ділянки; 4-поверхня штабелю вугілля.

Те, що потік має різну швидкість в різних точках об’єкту, можна побачити з рис. 3.19, де показано лінії струму при обтіканні об’єкту (експеримент).

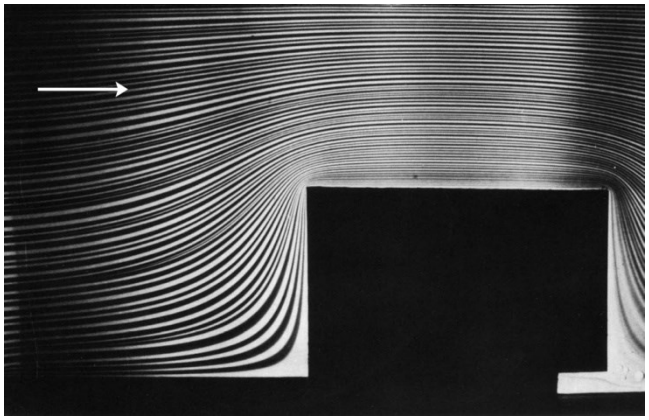


Рисунок 3.19 – Лінії струму (альбом Ван-Дайка).

Там, де лінії струму розташовуються близько одна до одної, швидкість потоку зростає (рис. 3.19). Наприклад, як можна бачити з рис. 3.19, це має місце біля кутових точок об’єкту. Таке явище свідчить про те, що інтенсивність випаровування води з різних ділянок, наприклад, штабелю вугілля, буде різною. Цей фактор потрібно врахувати при розробці математичної моделі для визначення моменту часу, коли потрібно знову провести зрошування поверхні вугілля з метою зменшення пилоутворення.

Розглянемо побудову моделі випаровування води після зрошування поверхні вугілля. Розглянемо лише одну ділянку поверхні штабелю, наприклад, ділянку №1 (рис. 3.18). Етапи розрахунку є наступними:

1. Визначається маса води dm_1, що подана на поверхню вугілля за період змочування:

$$dm_1 = Q_1 \cdot \rho_w \cdot dt ,$$

де Q_1 – витрата води на поверхню ділянки №1; dt – проміжок часу, протягом якого здійснювалося змочування; ρ_w – щільність води.

Відзначимо, що індекс «*1*» вказує на першу ділянку на поверхні штабелю.

Тут також слід зазначити, що швидкість подачі води V_{w1} на поверхню вугілля повинна бути обмежена. Швидкість подачі води не повинна бути

більшою, ніж коефіцієнт фільтрації матеріалу (вугілля). Ця швидкість розраховується так:

$$V_{w1} = \frac{Q_1}{S_1}, \text{ де } S_1 \text{ – площа змочування.}$$

В іншому випадку на поверхні буде утворюватися шар води та при наявності ухилу почнеться рух води по поверхні об’єкту.

2. Визначається об’єм води:

$$W_{w1} = \frac{dm_1}{\rho_w}, \text{ де } \rho_w \text{ – щільність води.}$$

3. Визначається об’єм вугілля, що «вбирає» масу води dm_1:

$$W_{coal-1} = \frac{W_{w1}}{n_0},$$

де n_0 – об’ємна пористість вугілля.

4. Визначається маса вугілля в цьому об’ємі:

$$dm_{coal-1} = W_{coal-1} \cdot \rho_{coal},$$

де ρ_{coal} – густина вугілля.

5. Визначається «початкова» вологість вугілля після завершення зрошування

$$P_{0-1} = \frac{dm_{w1}}{dm_{coal-1}}.$$

6. Визначається концентрація водяної пари біля вільної поверхні:

$$C_s = \frac{M \cdot P_{нас}}{R_U \cdot T}.$$

Параметри T, M, $P_{нас}$, R_U є відомими та відносяться до вхідних параметрів чисельної моделі.

7. Розраховуються числа Шмідта, Рейнольдса, Шервуда.

8. Розраховується коефіцієнт конвективного масообміну (3.11).

9. Розраховується маса води, що випарувалась з першої ділянки за час dt_1:

$$dm_{1evap} = Q_1 \cdot \rho \cdot dt_{evap}.$$

10. Визначається остаточна маса води в об’ємі вугілля:

$$dm_{1r} = dm_1 - dm_{1evap}.$$

11. Визначається вологість вугілля після часу випаровування dt_{evap}:

$$P_{0-2} = \frac{dm_{r1}}{dm_{coal-1}}.$$

12. Далі процес розрахунку повторюється, починаючи з п. 6.

13. Розрахунок здійснюється до моменту часу, коли вологість P ділянки зменшиться до 3 %. Це буде час, коли потрібно знову проводити змочування поверхні вугілля. Якщо зрошення нема, то далі починається процес пилоутворення, інтенсивність пилоутворення на даної ділянці розраховується на базі отриманої емпіричної моделі (3.1).

Але, важливим аспектом використання рівняння (3.10) є визначення концентрації водяної пари в повітрі C_∞ біля поверхні кожної ділянки поверхні вугілля. Для цього використовується розроблена чисельна модель, що розглядається далі. Розглянута математична модель процесу випаровування води з поверхні штабелю вугілля після зрошування інтегрована в програмний комплекс WatHIL (Розділ 4).

3.6 Чисельна модель розсіювання водяної пари

На наступному етапі було створено CFD-модель для аналізу рівня забруднення повітря пилом на промисловому майданчику із застосуванням захисного бар’єру відповідної форми.

Побудова CFD моделі здійснювалася таким чином, щоб реалізувати наступну процедуру розрахунку:

1. Визначити поле швидкостей повітряного потоку на промисловому майданчику за умови наявності захисного бар’єру відповідної форми.

2. Провести розрахунок інтенсивності емісії пилу залежно від локальної швидкості повітряного потоку над зоною пилоутворення, враховуючи наявність захисного бар'єру відповідної форми.

3. Виконати розрахунок концентраційного поля пилу на промисловому майданчику, яке формується внаслідок процесів конвекції та дифузії за умов розташування захисного бар'єру відповідної форми.

Складність вирішення цих завдань полягає в тому, що необхідно проводити розрахунки в області зі складною геометрією.

Для 2D моделювання процесу розсіювання водяної пари в повітрі внаслідок процесу випаровування зі змоченої поверхні використовується таке рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\sum_{i=1}^{n}Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i) \quad (3.12)$$

де C – значення концентрації пари; u, v – компоненти вектору швидкості вітру в проекції на осі координат x і y відповідно, м/с; x_i, y_i – декартові координати i-ого джерела (ділянки), де має місце випаровування води, м; t – час, с; μ_x, μ_y – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії, м^2/с; $\delta(x–x_i)\delta(y–y_i)$ – дельта-функція Дірака.

Важливим аспектом цієї моделі є те, що вона враховує зміну інтенсивності випаровування води з часом, тобто $Q=f(t)$. При такому підході в межах однієї моделі можна змоделювати різні типи інтенсивності випаровування., наприклад, на базі емпіричної моделі, що була отримана вище.

Граничні умови для (3.12) наступні:

– на границі входу повітряного потоку: $C=C\big|_{\text{entrance}}$ – відома фонова концентрація водяної пари в атмосфері;

– на границі виходу повітряного потоку: $\frac{\partial C}{\partial n}=0$, де n –зовнішня нормаль до границі.

Початкова умова $C\big|_{t=0}=0$ або $C\big|_{t=0}=C_0$, де C_0 – відома фонова концентрація водяної пари. Коефіцієнти турбулентної дифузії визначаються за формулами:

$\mu_y = k_0 \cdot u$, $\mu_y = k_0 \cdot v$, де u, v – компоненти швидкості повітряного потоку, k_0=0,1 (Г. Марчук, М. Берлянд). Швидкість і напрямок вітру виступають вхідними параметрами та визначаються на основі метеорологічних даних.

Таким чином, для рішення задачі про випаровування води з поверхні, яка була змочена для зменшення інтенсивності пилоутворення, потрібно вирішити крайову задачу (3.12) з відповідними початковими та граничними умовами.

Чисельне інтегрування рівняння (3.12) виконується із застосуванням методу фізичного розщеплення. При цьому для побудови різницевої схеми було реалізовано відповідне фізичне розщеплення моделюючого рівняння:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial C}{\partial t} + \dfrac{\partial uC}{\partial x} + \dfrac{\partial vC}{\partial y} = 0 \\ \dfrac{\partial C}{\partial t} = \dfrac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \dfrac{\partial C}{\partial x}\right) + \dfrac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \dfrac{\partial C}{\partial y}\right), \\ \dfrac{\partial C}{\partial t} = \sum_{i=1}^{n} Q_i(t)\delta(x - x_i)\delta(y - y_i) \end{cases} \tag{3.13}$$

Перше рівняння з (3.13) – це рівняння, що описує конвективний перенос водяної пари в повітрі, друге рівняння – рівняння дифузії, третє рівняння описує зміну концентрації водяної пари під впливом джерела випаровування.

Під час чисельного інтегрування застосовуються наступні залежності [13, 41]:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u^+_{i+1,j} C^{n+1}_{i,j} - u^+_{i,j} C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^+_x C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u^-_{i+1,j} C^{n+1}_{i+1,j} - u^-_{i,j} C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^-_x C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v^+_{i,j+1} C^{n+1}_{i,j} - v^+_{i,j} C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^+_y C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v^-_{i,j+1} C^{n+1}_{i,j+1} - v^-_{i,j} C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y} = L^-_y C^{n+1}.$$

Змінно-трикутна схема розщеплення для рівняння конвективного переносу пари:

– на першому кроці:

$$\frac{C^k_{i,j} - C^n_{i,j}}{\Delta t} + L^+_x C^k + L^+_y C^k = 0;$$

– на другому кроці:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^k_{i,j}}{\Delta t} + L^-_x C^{n+1} + L^-_y C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення С у кожному рівнянні обчислюється за методом «рухомого рахунку».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії застосовується двоетапна різницева схема розщеплення, що виглядає наступним чином (А. Самарський):

$$\frac{C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} - C^n_{i,j}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} + C^{n+\frac{1}{2}}_{i-1,j}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j} + C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{n+\frac{1}{2}}_{i,j}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C^{n+1}_{i+1,j} - C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C^{n+1}_{i,j+1} - C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y^2} \right].$$

Для чисельного інтегрування третього рівняння з системи (3.13) використовується метод Ейлера.

Для розв'язання задачі аеродинаміки (розрахунок швидкості повітряного потоку біля поверхні відвалу, штабеля) використовується рівняння для потенціалу швидкості, що було зведено до вигляду («нестаціонарне» рівняння):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

де t – фіктивний час.

Для розв'язанням даного рівняння необхідно записати початкову умову для фіктивного часу, наприклад, P=0 для t=0.

Далі для розв'язання «нестаціонарного» рівняння було використана схема умовної апроксимації. На першому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right].$$

На другому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Невідоме значення концентрації домішки на кожному кроці визначається з використанням методу «рухомого рахунку» (за явною формулою).

Значення потенціалу швидкості на кожному кроці визначалося за явною формулою. Розрахунок закінчується за наступної умови:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число. У розрахунках було прийнято ε =0,01; n – номер ітерації.

Далі були розраховані компоненти швидкості повітряного потоку за наступними формулами:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

На базі розробленої чисельної (CFD) моделі створено комп’ютерний код, мова програмування – FORTRAN.

Склад комп’ютерного коду:

– Q44T.DAT – файл даних для розрахунку 2D концентраційного поля водяної пари на промисловому майданчику;

– Q44T3 – побудова граничних умов для розрахункової області (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

– Q44T4 – розрахунок концентраційного поля водяної пари (змінно-трикутна різницева схема, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q44T5 – розрахунок концентраційного поля водяної пари (метод А. Самарського, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– QW44T6 – розрахунок концентраційного поля водяної пари внаслідок випаровування (метод Ейлера, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– QW44T5 – розрахунок поля потенціалу швидкості (перший крок розщеплення, метод А. Самарського, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– QW44T6 – розрахунок поля потенціалу швидкості (другий крок розщеплення, метод А. Самарського, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– QWT6 – розрахунок поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику.

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Введення початкових даних (місце розташування області пилоутворення, розміри області пилоутворення, швидкість повітряного потоку і т.д.).

2. Рішення задачі аеродинаміки (розрахунок поля потенціалу швидкості).

3. Розрахунок поля швидкості повітряного потоку.

4. Рішення чисельної моделі масопереносу водяної пари в повітрі.

5. Розрахунок динаміки випаровування з поверхі, що була змочена.

6. Виведення «на друк» поля концентрації водяної пари на промисловому майданчику.

Для проведення комп’ютерного експерименту потрібні наступні дані:

1) розміри області, що була змочена;

2) глибина змочування вугілля;

3) закон « випаровування»;

4) швидкість набігаючого повітряного потоку;

5) крок за часом;

6) розміри розрахункової сітки;

7) розміри розрахункової області;

На наступному етапі роботи було здійснено інкорпорування коду ZFILT (розрахунок глибини зони змочування) в «тіло» даного коду, що дає можливість проводити багатофакторний обчислювальний експеримент з урахуванням динаміки змочування поверхні вугілля з подальшим розрахунком процесу випаровування води зі змоченої поверхні.

Далі наведено приклад використання розробленого коду. Розглядалася поверхня області пилоутворення на промисловому майданчику, що мала огороджуючі бар'єри. На поверхню області пилоутворення подавалася вода, параметри цього процесу аналогічні тим, що розглядались раніше, а саме:

- до моменту часу t=10 с швидкість подачі води на поверхню вугілля 0,3 см/с, далі витрата збільшується до 0,5 см/с; зрошування закінчується для моменту часу t=15 с;

- нестача насичення 0,12;

- коефіцієнт фільтрації 0,7 см/с;

- розрахунковий крок за часом Δt=0,01 с;

- початкова глибина z=0.001 см для моменту часу t=0 с;

- розміри області, що була змочена 5 м×1 м;

- концентрація водяної пари в розрахункової області 10,3 г/м^3 (початкова умова);

- концентрація водяної пари в повітрі, що «входить» в область дослідження, 10,3 г/м^3 (гранична умова на вході в розрахункову область);

- температура повітря 20 °С;

- закон «випаровування» – розглянута вище методика (визначення чисел Рейнольдса, Шмідта, Шервуда і т. д.);

- швидкість набігаючого повітряного потоку 6 м/с;

- крок за часом 0,5 с;

- розміри розрахункової сітки 25×21 контрольний елемент;

- розміри розрахункової області 50 м×21 м.

Глибина змочування розраховувалася «всередині» основного коду за допомогою коду ZFILT. Зона змочування – похилий бік штабеля вугілля (рис. 3.20).

Далі на рисунках показано матриці концентрації водяної пари в області дослідження для трьох сценаріїв (момент часу 25 с):

1. Сценарій № 1: відсутній захисний бар'єру біля штабеля (рис.3.20)

2. Сценарій № 2: наявний вертикальний захисний бар'єр на відстані 10 м від штабеля (рис.3.21)

3. Сценарій № 3: наявний вертикальний захисний бар'єр складної форми на відстані 10м від штабеля (рис.3.22)

Кожне число на матриці показує значення концентрації водяної пари в повітря як відсоток від максимальної концентрації.

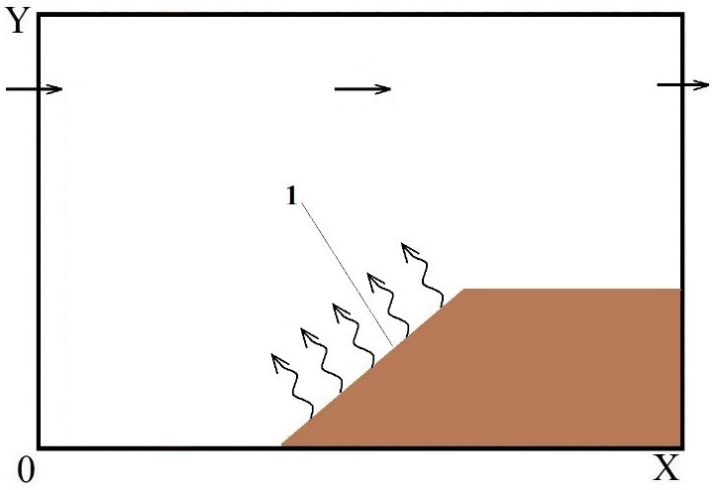


Рисунок 3.20 – Схема розрахункової області, Сценарій №1.

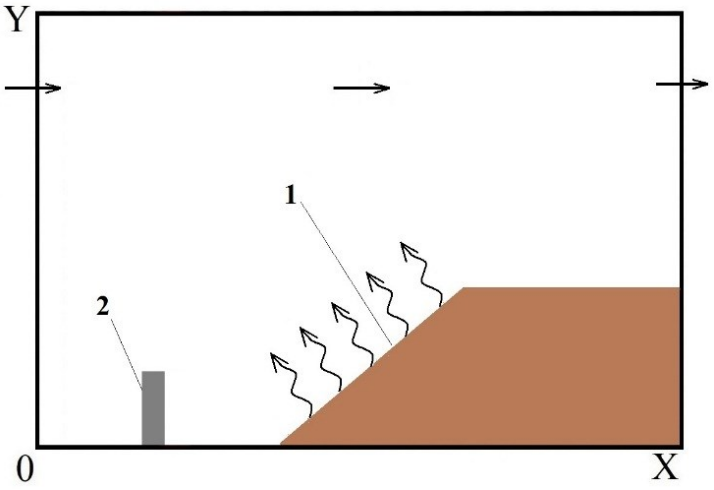


Рисунок 3.21 – Схема розрахункової області, Сценарій №2.

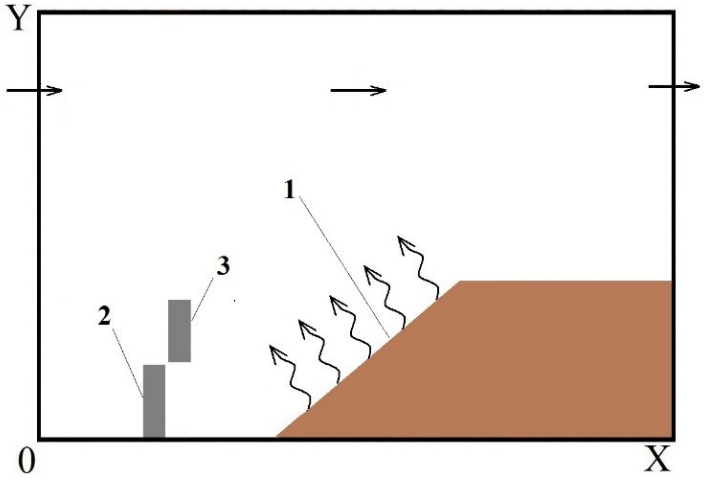


Рисунок 3.22 – Схема розрахункової області, Сценарій №3.

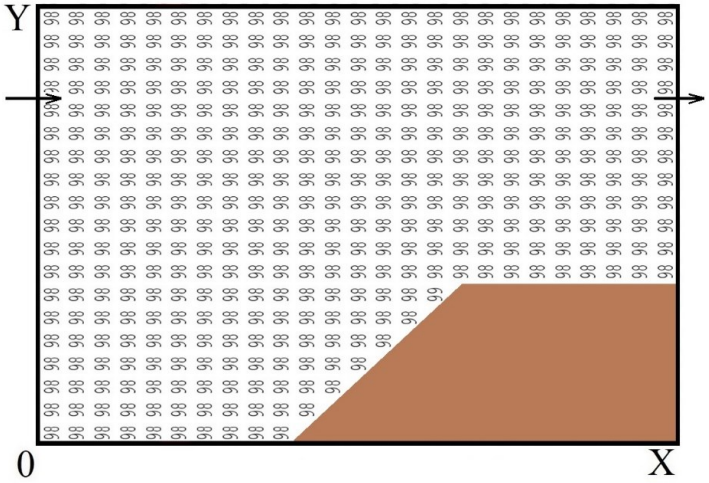


Рисунок 3.23 – Концентрація водяної пари, Сценарій №1.

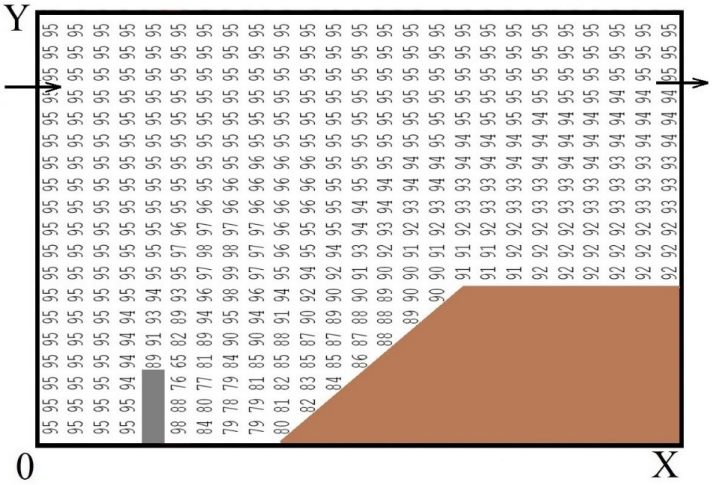


Рисунок 3.24 – Концентрація водяної пари, Сценарій №2.

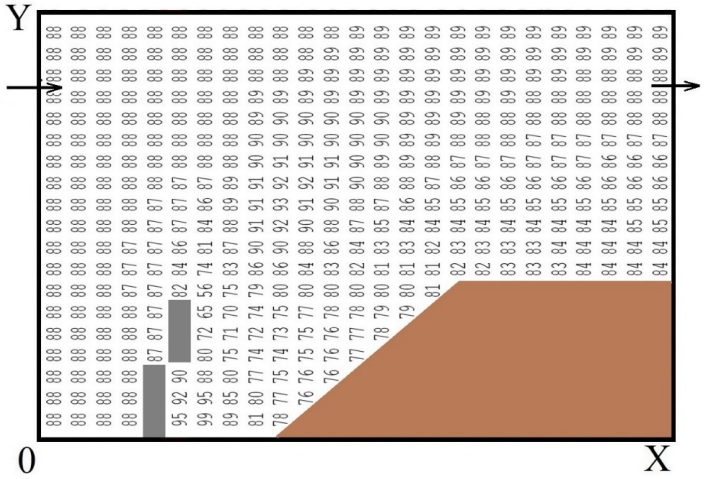


Рисунок 3.25 – Концентрація водяної пари, Сценарій №3.

Аналіз даних комп'ютерного моделювання показує, шо для першого сценарію біля поверхні змочування вологість дорівнює 98 % від максимального значення вологості в області дослідження. Для другого сценарію вологість повітря в даній області досягає значення порядку 82-89 %. Для третього сценарію вологість повітря біля даної області порядку 78-81 %. Таким чином, можна бачити, що додаткове використання захисного бар'єру біля поверхні зрошування дає можливість зменшити інтенсивність випаровування і, як результат, продовжити час, протягом якого пилоутворення мінімальне.

3.7 Визначення швидкості гравітаційного осадження часток пилу

На першому етапі досліджень експериментальним шляхом визначалась швидкості гравітаційного осадження вугільного пилу. Для визначення цієї швидкості здійснювалось скидання маси пилу 0.01 г (**фракція до 1 мм**) у мірну ємність, відбувалась сповільнена відеозйомка цього процесу, на основі якої визначався час осадження пилу (рис. 3.26, а-в).



а б в

Рисунок 3.26 – Положення пилу в мірній ємності:

а – на початку руху; б – в момент часу t=0,02 с; в – в момент часу t=0,05 с.

Далі визначалась швидкість гравітаційного осадження пилу w_s:

$$w_s = \frac{L}{t},$$

де L – шлях руху пилу; t – час осадження пилу.

Експериментальне значення w_s склало 1,5 см/с .

Дане значення далі було використано при проведенні обчислювальних експериментів на базі побудованих чисельних моделей.

3.8 Визначення маси пилу, що захоплюється рухомою краплею води

Особливо важливим аспектом є визначення ефективності подачі води в пилову хмару з метою зменшення концентрації пилу в повітрі робочої зони. Принцип знепилювання базується на «захопленні» краплею води часток пилу.

Під ефективністю мається на увазі кількість (маса) вугільного пилу, що може бути «захоплена» краплею води, що рухається в пиловому середовищі. Визначення ефективності такого «захоплення» пилових часток є дуже важливим для розробки науково-обґрунтованої стратегії знепилювання.

Слід зазначити, що дослідження цього процесу, зокрема, з метою визначення кількісті (маси) пилу, що може захопити крапля води, є досить складним дослідженням. Існують напівемпіричні моделі для рішення даної задачі. Наприклад, запропоновано таку залежність для визначення кількісті пилу, що захоплює крапля води (**Юрченко):**

$$Q = \frac{S\pi d^2 \omega \eta}{4}, \tag{3.14}$$

де Q – кількість пилових частинок, що «захоплені» краплею води; d – діаметр краплі води; ω – відносна швидкість; η=0,48 – емпіричний параметр; S – концентрація пилових частинок.

В роботі [13] розроблена математична модель для оцінювання маси пилу, що може бути «захоплена» краплею води. Дана модель базується на використанні формули Лапласа для визначення тиску всередині краплі. Але аналіз літературних джерел показав, що потрібні подальші дослідження в даному напряму. Зокрема, потрібно мати обґрунтовані кількісні характеристики здатності краплі, що рухається, «захопити» певну масу пилу.

Нижче наведено результати проведених експериментальних досліджень по визначенню кількісті вугільного пилу, що «захоплює» крапля води при русі в області пилового забруднення. Була висунена робоча гіпотеза – маса вугільного пилу, що «захоплює» крапля води при русі – пропорційна масі краплі.

При проведенні експериментів використовувалися фракції пилу до 1 мм. Експеримент проводився в два етапи.

Етап № 1. Розглядається процес скочування краплі води по пластині (матеріал пластини – пінопласт, незмочувана поверхня), на якій є частки вугільного пилу. Маса пилу на пластині 0,5 г розподілялася на площі прямокутника з розмірами 7см × 5см . На пластину подавалась крапля води, яка

скочувалась по пластині (рис. 3.27) та попадала в ємність, що розташована під пластиною (пластина має кут 60°). Далі здійснювалось зважування цієї крапля з вугільним пилом на її поверхні.

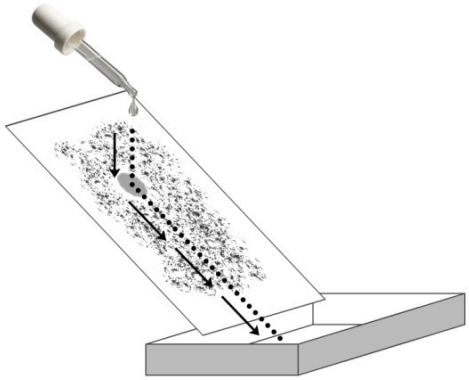


Рисунок 3.27 – Схема скочування краплі води по поверхні, що забруднена вугіллям.

Експеримент проводився для трьох середніх значень маси краплі води: 0,05 г; 0,07 г; 0,1 г (рис. 3.28).

Крапля води долала відстань 1,5 см від кінця пластини («короткий» шлях руху) та відстань 6 см від кінця пластини («довгий » шлях руху). Скид на різній відстані від кінця пластини мав мету визначити, чи потрібен «значний» час на «прикріплення» часток пилу до краплі та чи лімітована маса пилу, що може бути «захоплена» краплею води (рис. 3.29). Здійснювалася сповільнена відеозйомка процесу, що моделювався.



Рисунок 3.28 – Зважування «чистої» краплі води.

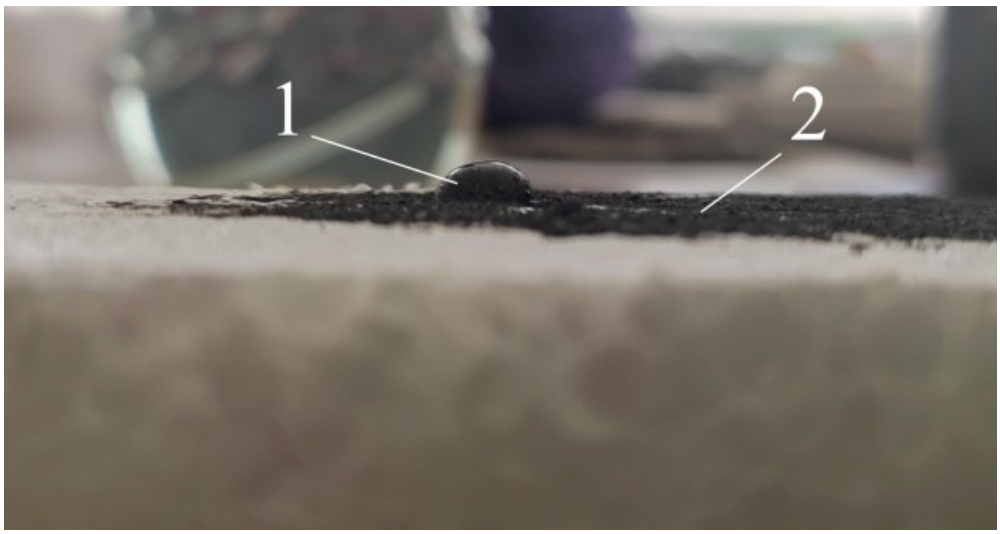


Рисунок 3.29 – «Крапля води + вугільний пил» на її поверхні пластині: 1 – крапля; 2 – поверхня з вугільним пилом.

Проведені дослідження показали наступне:

1. Захоплення краплею води вугільного пилу відбувається практично «миттєво», так як не було різниці в масі вугільного пилу, що «захоплена» при короткому «шляху» краплі або при довгому «шляху» краплі. Час руху на «короткому» шляху дорівнював, в середньому, t_{max}=0,3 с. Тобто, після 0,3 с припиняється «захоплення» пилу. Таким чином, при практичних розрахунках можна прийняти, що протягом 0,3 с крапля «захоплює» максимально можливу масу вугільного пилу.

2. Середнє значення маси вугільного пилу, що «захоплений» краплею води, є таким:

- 0,01 г пилу, при масі краплі 0,05 г (тобто 17 % від маси краплі);
- 0,013 г пилу, при масі краплі 0,07 г (тобто 18 % від маси краплі);
- 0,02 г пилу, при масі краплі 0,1 г (тобто 19 % від маси краплі).

В середньому, можна вважати, що крапля води захоплює кількість пилу, що відповідає приблизно 18 % від маси краплі. Далі, при побудові математичної моделі даного процесу буде використовуватися це значення у долях одиниці, тобто «0,18». Дане значення використовується далі для побудови математичної моделі захоплення пилу краплями води (модель масопереносу). Таким чином, експериментальним шляхом підтверджена робоча гіпотеза, що була висунута.

Можна надати таке пояснення отриманим експериментальним даним: кількість вугільного пилу, що «захоплює» крапля води, пропорційна площі поверхні краплі: чим більше маса краплі – тем більш площа її поверхні, а значить тим більше поверхня контакту краплі з частками пилу.

Якщо прийняти, що процес «захоплення» пилу відбувається за лінійною залежністю, то можна, на основі отриманих експериментальних даних, отримати емпіричну модель, що дозволяє визначати масу пилу, що «захоплює» крапля води за час *t*. Модель має вигляд:

$$Q_c(t) = \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}} t, \tag{3.15}$$

де M_w – маса краплі води, г; k=0,18 – емпіричний коефіцієнт, що враховує можливість краплі «захопити» вугільний пил;$Q_c(t)$ маса пилу, що «захоплює» крапля води за час t; t – час, с (мінімальне значення 0 с, максимальне значення t_{max}=0,3 с).

Можно також навести інший вигляд емпірічний моделі, а саме

$$M_c(t) = k \cdot M_w - (0.3 - t)\alpha \tag{3.16}$$

де $M_c(t)$ – маса пилу; t – час, с; $\alpha = \frac{k \cdot M_w}{t_{\max}}$.

Здійснимо математичний аналіз побудованої емпіричної моделі (3.16) на основі теорії границь. Для цього знайдемо границю даної залежності при $t \to 0$. Маємо:

$$\lim_{t \to 0}(k \cdot M_w - (0.3 - t)\alpha) = k \cdot M_w - 0.3 \cdot \alpha =$$

$$= k \cdot M_w - 0.3\frac{k \cdot M_w}{t_{\max}} = k \cdot M_w - 0.3\frac{k \cdot M_w}{0.3} = 0.$$

Таким чином, при $t \to 0$ маса пилу, що «захоплює» крапля води, дорівнює 0. Це значення відповідає фізиці процесу, що моделюється.

З іншого боку, розглянемо границю залежності (3.16) при $t \to t_{\max}$. Маємо:

$$\lim_{t \to t_{\max}}(k \cdot M_w - (0.3 - t)\alpha) = k \cdot M_w - (0.3 - t_{\max})\alpha =$$

$$= k \cdot M_w - (0.3 - 0.3)\alpha = k \cdot M_w.$$

Як можна бачити, при $t \to t_{\max}$, отримане значення $k \cdot M_w$ дорівнює максимальній масі вугільного пилу, що може «захопити» крапля води за час t_{max}=0,3 с. Це значення також відповідає фізиці процесу, що моделюється. Таким чином, математичний аналіз отриманої емпіричної моделі, на основі теорії границь, підтверджує її коректність.

Розглядаючи процес боротьби з пилом слід мати на увазі, що процес «захоплення» краплею часток пилу лімітується також часом перебування краплі води в повітрі (крапля води осаджується з певною швидкістю та рано чи пізно осяде на поверхні).

3.9 Математичне моделювання процесу зменшення пилового забруднення повітря шляхом подачі води в пилову хмару

Розглянемо побудову чисельної моделі, що використовується для аналізу ефективності подачі води в пилову хмару для зменшення рівня забруднення повітря на промисловому майданчику. Розробка чисельної моделі здійснюється для умови розташування поверхні пилоутворення на промисловому майданчику, що має певні розміри. Відомі параметри метеорологічної ситуації – профіль вітру та значення коефіцієнтів атмосферної дифузії. Відома інтенсивність пилоутворення для заданих метеоумов. Вода подається в пилову хмару (координати місця подачі води відомі), що формується при емісії пилу, задане значення кількості води, що потрапляє у хмару за певний проміжок часу та розмір крапель води.

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

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial wC}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right)+Q_i(t)\cdot\delta(x-x_i)\cdot\delta(y-y_i)\cdot\delta(z-z_i), \quad (3.17)$$

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.

Тут прийнято: $w=w–w_s$, де w_s – швидкість гравітаційного осадження часток пилу (відома величина).

Рівняння масопереносу доповнюється наступними граничними умовами:

1. $C=0$ на границі входу потоку.

2. $\left.\frac{\partial C}{\partial n}\right|_{\Gamma_2}=0$ на границі виходу потоку.

3. Поверхня $z=0$ – є твердою, та на цій границі реалізується умова непротікання. Умова $C=0$ реалізується на площині $z=H$, де H – висота розрахункової області.

Для рівняння масопереносу ставиться наступна початкова умова: $C=0$ для $t=0$.

Вплив процесу атмосферної дифузії на розповсюдження домішок визначається через використання відповідних коефіцієнтів μ_x, μ_y, μ_z, значення яких розраховуються так (Г. Марчук, М. Берлянд):

$$\mu_x\approx\mu_y,\ \mu_y=k_0\cdot u,\ \mu_z=k_1\left(\frac{z}{z_1}\right)^m,$$

де k_0=0,1÷1 м; k_1=0,1÷0,1 м^2/с; $m\approx1$ – параметр.

Залежність для розрахунку зміни швидкості вітру з висотою y виглядає наступним чином:

$$u=u_1\cdot\left(y/y_1\right)^n,$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті y_1, n=0,16.

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

$$\frac{\partial S}{\partial t}+\frac{\partial uS}{\partial x}+\frac{\partial vS}{\partial y}+\frac{\partial wS}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial S}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial S}{\partial y}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial S}{\partial z}\right)+Q_w(t)\cdot\delta(x-x_i)\cdot\delta(y-y_i)\cdot\delta(z-z_i), \qquad (3.18)$$

де S – концентрація крапель води в повітрі, w_s – швидкість гравітаційного осадження крапель води (відома величина, в рівнянні прийнято $w=w-w_s$). Значенні інших параметрів та крайові умови є аналогічними тим, що записані для (3.17). Процесом випаровування краплі води будемо нехтувати, так як у більшості випадків температура повітря не є високою для забезпечення швидкого випаровування краплі. Для розрахунку маси пилу, що «захоплює» крапля води за час t, використовується емпірична модель (3.15).

Таким чином, для оцінювання ефективності подачі води в пилову хмару потрібно вирішити рівняння (3.15), (3.17), (3.18).

Розглянемо побудову чисельної моделі на прикладі рівняння масопернеосу пилу (3.17). Чисельне інтегрування рівняння (3.17) виконується шляхом застосування методу фізичного розщеплення та кінцево-різницевих схем. При цьому реалізується таке розщеплення:

$$\begin{cases}
\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{+}\overset{1}{C})=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{1x}\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{1y}\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{1z}\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{-}\overset{2}{C})=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{2x}\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{2y}\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{2z}\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{-}\overset{3}{C})=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{2x}\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{2y}\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{2z}\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial z})\right)\\
\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{+}\overset{4}{C})=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{1x}\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{1y}\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{1z}\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{5}{C}}{\partial t}=\sum_{i=1}^{n}Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i).
\end{cases} \qquad (3.19)$$

В системі рівнянь (3.19) використовуються позначення:

$$\vec{V}^{+}=\{u^{+},v^{+},w^{+}\},\vec{V}^{-}=\{u^{-},v^{-},w^{-}\},$$

$$u^{+}=\frac{u+|u|}{2},u^{-}=\frac{u-|u|}{2},v^{+}=\frac{v+|v|}{2},v^{-}=\frac{v-|v|}{2},w^{+}=\frac{w+|w|}{2},w^{-}=\frac{w-|w|}{2},$$

$$\bar{\mu}_{1x}=\frac{\mu}{1+\frac{u^{+}\Delta x}{\mu}},\bar{\mu}_{1y}=\frac{\mu}{1+\frac{v^{+}\Delta y}{\mu}},\bar{\mu}_{1z}=\frac{\mu}{1+\frac{w^{+}\Delta z}{\mu}},\bar{\mu}_{2x}=\frac{\mu}{1-\frac{u^{-}\Delta x}{\mu}},\bar{\mu}_{2y}=\frac{\mu}{1-\frac{v^{-}\Delta y}{\mu}},\bar{\mu}_{2z}=\frac{\mu}{1-\frac{w^{-}\Delta z}{\mu}}.$$

Кожне з рівнянь системи (3.19) відображає окремий напрямок передавання збурень через грані різницевої комірки. Різницевий аналог цієї системи можна подати у такому вигляді:

– перший крок:

$$\frac{\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1}-\overset{1}{C}_{ijk}^{n}}{\Delta t}+(L_x^{+}+L_y^{+}+L_z^{+})(\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1}\,\xi+\overset{1}{C}_{ijk}^{n}(1-\xi))=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}(M_{xx}^{+}+M_{yy}^{+}+M_{zz}^{+})\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1}+\\+(M_{xx}^{-}+M_{yy}^{-}+M_{zz}^{-})\overset{1}{C}_{ijk}^{n}\end{bmatrix},\quad(3.20)$$

де $\xi\in[0,1]$ – параметр, $\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1/2}=\frac{\overset{1}{C}_{ijk}^{n+1}+\overset{1}{C}_{ijk}^{n}}{2}$;

– другий крок:

$$\frac{\overset{2}{C}_{ijk}^{n+1}-\overset{2}{C}_{ijk}^{n}}{\Delta t}+(L_x^{-}+L_y^{-}+L_z^{-})(\overset{2}{C}_{ijk}^{n+1}\,\xi+\overset{2}{C}_{ijk}^{n}(1-\xi))=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\left(M_{xx}^{-}+M_{yy}^{-}+M_{zz}^{-}\right)\overset{2}{C}_{ijk}^{n+1}+\\+\left(M_{xx}^{+}+M_{yy}^{+}+M_{zz}^{+}\right)\overset{2}{C}_{ijk}^{n}\end{bmatrix}.\quad(3.21)$$

– третій крок – використовується різницеве рівняння (3.21), четвертий крок – застосовується диференційне рівняння (3.20), п’ятий крок записується так:

$$\frac{\overset{5}{C}_{ijk}^{n+1}-\overset{5}{C}_{ijk}^{n}}{\Delta t}=\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i(t^{n+1/2})\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)}{\Delta x\Delta y\Delta z}.\quad(3.22)$$

У дискретній формі дельта-функція Дірака розподіляється по об'єму різницевої комірки, зберігаючи при цьому сумарну кількість водяної пари. Вона набуває нульового значення всюди, за винятком тих комірок, де знаходиться і-те джерело забруднення.

Оператори різницевих рівнянь записуються так:

$$L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}}{2\Delta x}, L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta x},$$

$$L_y^+ = \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{ijk} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}}{2\Delta y}, L_y^- = \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta y},$$

$$L_z^+ = \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{ijk} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{2\Delta x}, L_z^- = \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta z}.$$

На основі розробленої чисельної моделі було створено комп'ютерний код, написаний мовою програмування FORTRAN.

Склад комп'ютерного коду:

– Q33T.DAT – файл даних для розрахунку 3D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику;

– Q33T1 – розрахунок 3D концентрації крапель води в повітрі (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q33T3 – побудова граничних умов для 3D області при рішенні задачі про перенесення крапель води в повітрі (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q33T4 – побудова граничних умов для 3D області при рішенні задачі про перенесення пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q33T5 – розрахунок процесу захоплення краплею води часток пилу в повітрі (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Введення початкових даних (місце області пилоутворення, місце подачі води, розміри області дослідження і т. д.).

2. Рішення 3D чисельної моделі переносу пилу в повітрі.

3. Рішення 3D чисельної моделі переносу крапель води в повітрі.

4. Рішення задачі про взаємодію «крапля води + частки пилу».

5. Виведення «на друк» поля концентрації пилу на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні наступні дані:

1. Геометрична форма та розміри ділянки пилоутворення.

2. Інтенсивність подачі води в пилову хмару.

3. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

4. Швидкість набігаючого повітряного потоку на одиничній висоті.

5. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу та крапель води.

6. Крок за часом.

7. Розміри 3D розрахункової сітки.

8. Розміри 3D розрахункової області.

Особливості розробленої чисельної CFD моделі:

1. Можливість рішення задач по оцінюванню ефективності подачі води в пилову хмару при різних метеорологічних умовах.

2. Можливість моделювання різних сценаріїв подачі води в пилову хмару та різної інтенсивності пилоутворення.

3. Чисельна модель враховує основні фізичні параметри, що впливають на процес розсіювання крапель води та пилу на промислових майданчиках.

Далі наведено результати комп'ютерного експерименту по оцінюванню ефективності пилопригнічення при розпиленні крапель води на поверхню вугілля. Моделювання здійснено при таких даних:

1. Геометрична форма та розміри ділянки пилоутворення – прямокутник 9м×5м.

2. Інтенсивність подачі води в пилову хмару 2 кг/с.

3. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки) – 900 мг/с (безрозмірне значення).

4. Швидкість набігаючого повітряного потоку на одиничній висоті 7 м/с.

5. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу та крапель води: 0,001 м/с (для часток вугілля) та 0,005 м/с (для крапель води); маса краплі води 0.1 г.

6. Крок за часом 0,01 с.

7. Розміри 3D розрахункової сітки 25м×21м×21м контрольний елемент.

8. Розпил води має місце на висоті 3 м над областю пилоутворення.

9. Розміри розрахункової області 25м×21м×10,5м.

Далі на рис. 3.31 показана концентрація пилу для сценарію №1 (відсутнє зрошування) та на рис. 3.32 для сценарію №2 (є розпилювання води), час t=80 с, переріз y=11 м. Концентрація пилу виражена у відсотковому співвідношенні до максимальної концентрації, зафіксованої в перерізі.

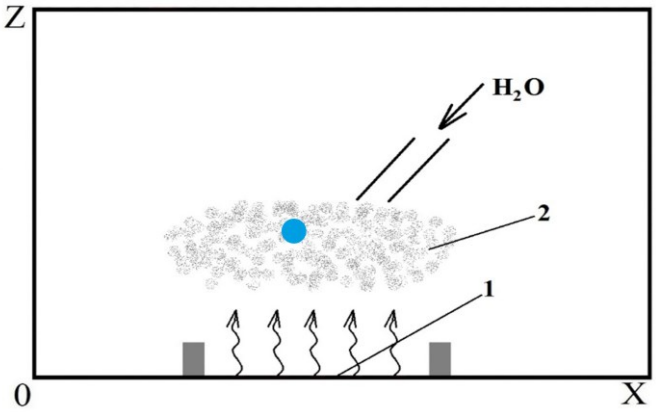


Рисунок 3.30 – Розрахункова схема:

1 – область пилоутворення; 2 – область розпилювання води.

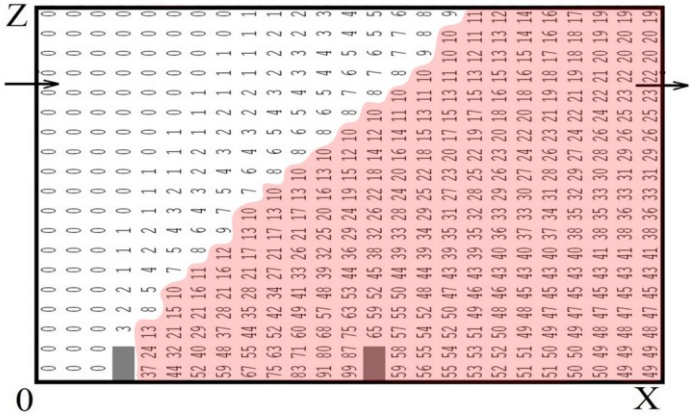


Рисунок 3.31 – Область пилового забруднення повітря.

(відсутнє розпилювання води).

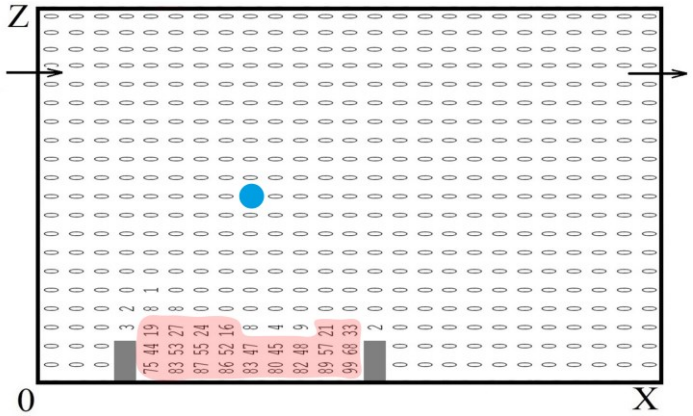


Рисунок 3.32 – Область пилового забруднення повітря

(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.

Висновки до розділу 3

1. В розділі наведено результати комплексу експериментів по дослідженню інтенсивності пилоутворення від забрудненої вугільним пилом поверхні при різній швидкості повітряного потоку.

2. На основі обробки результатів фізичного експерименту побудовані емпіричні моделі, що дають змогу здійснити експрес розрахунок інтенсивності емісії вугільного пилу від забруднених поверхонь.

3. Експериментальним шляхом встановлено, що рух часток пилу по поверхні вугілля (процес «creep») починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=2.5÷2.9 м/с; рух часток пилу біля поверхні вугілля (процес «saltation») починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=3.3÷3.6 м/с; відокремлення частинок від поверхні вугілля (suspension) та їх перенесення потоком повітря починається при швидкості повітряного потоку порядку v_s=4.1÷4.5 м/с.

4. Експериментальним шляхом визначено закономірність зміни вологості вугілля при випаровуванні: зниження вологості йде швидко протягом перших 7-8 хв; за цей проміжок часу вологість зменшується в 2 рази при швидкості повітряного потоку 4,6 м/с та в 3 рази при швидкості повітряного потоку 7,1 м/с.

5. Експериментальним шляхом визначено закономірність інтенсивності пилоутворення при різній вологості вугілля та різній швидкості повітряного потоку над поверхнею, що була змочена.

6. На основі обробки експериментальних даних отримано емпіричні моделі для експрес оцінювання зміни вологості вугілля з часом при різній швидкості повітряного потоку.

7. Побудовано чисельні моделі розсіювання водяної пари в повітрі при випаровуванні води зі змоченої поверхні вугілля; побудовані чисельні моделі використовують додаткову експрес модель для визначення інтенсивності масопереносу пари від змоченої поверхні вугілля.

8. Результати комп'ютерного моделювання поширення водяної пари на промисловому майданчику показали, що запропоновано модель є ефективним сучасним інструментом дослідження складних процесі масопереносу в задачах охорони праці.

РОЗДІЛ 4
ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНИХ БАР'ЄРІВ З ПЕРФОРАЦІЄЮ

У 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;

2) частковою перфорований знизу бар'єр;

3) частковою перфорований зверху бар'єр;

4) частковою перфорований знизу бар'єр та з додатковим горизонтальним елементом.

В розділі побудовані CFD моделі, що дають можливість прогнозувати рівень пилового забруднення робочих зон на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів даної форми.

4.1 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні повністю перфорованих бар'єрів

В лабораторії кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» УДУНТ був проведений комплекс експериментальних досліджень по визначенню аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику, де наявна зона пилоутворення. Дослідження проводились для перфорованих захисних бар'єрів. На першому етапі дослідження здійснювався аналіз впливу захисних бар'єрів, що мають перфорацію по всій площі. Розглядались наступні сценарії:

1) пористість бар'єру 20 % (рис. 4.1);

2) пористість бар'єру 30 % (рис. 4.2);

3) пористість бар'єру 38 % (рис. 4.3).

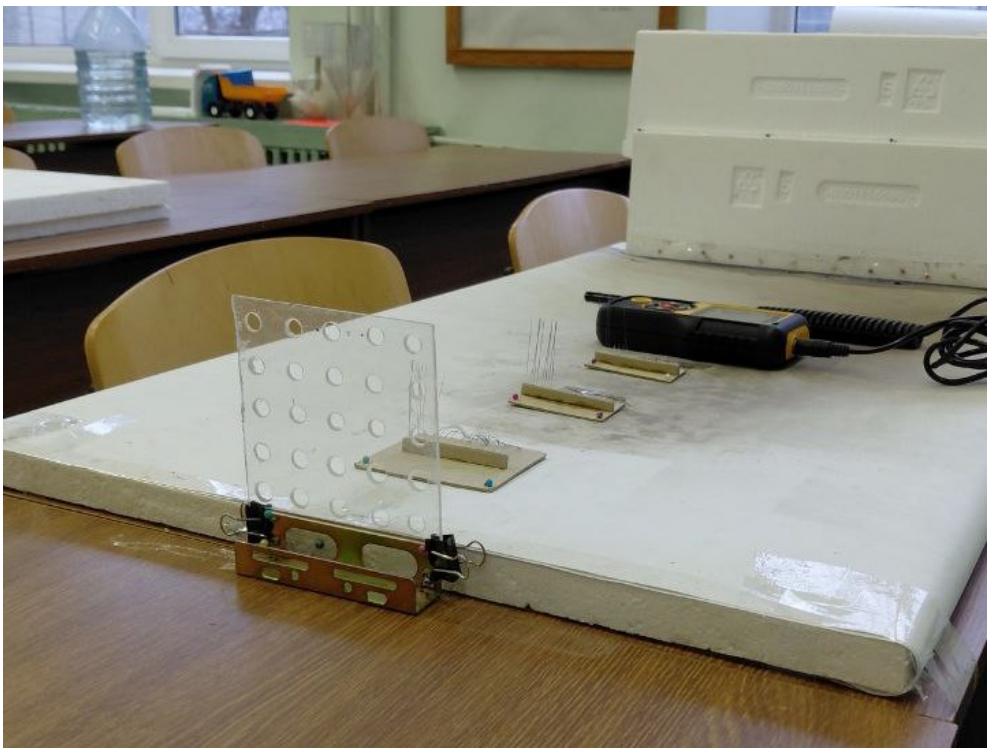


Рисунок 4.1 – Модель захисного бар’єру (пористість бар’єру 20 %).

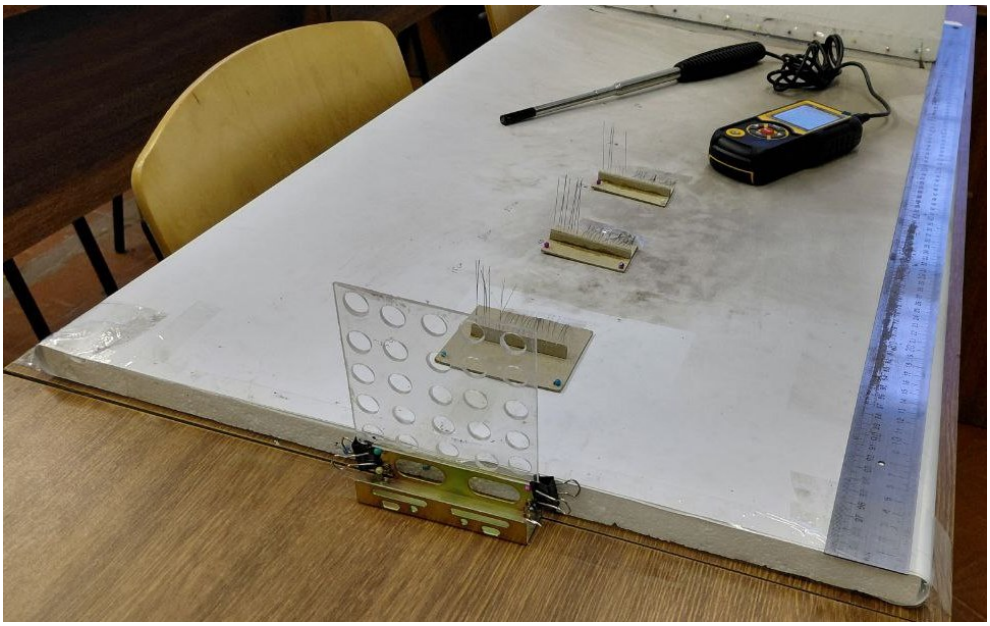


Рисунок 4.2 – Модель захисного бар’єру (пористість бар’єру 30 %).

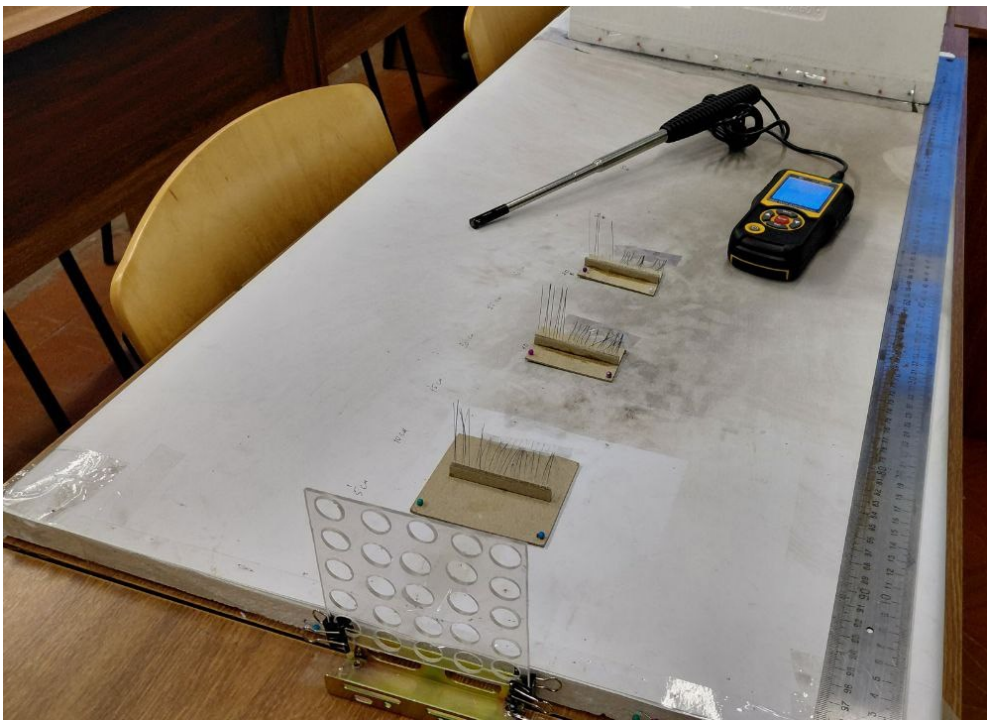


Рисунок 4.3 – Модель захисного бар’єру (пористість бар’єру 38 %).

Швидкість повітряного потоку вимірювалась з використанням анемометра НТ-9830.

Оскільки вимірювання здійснювалось у турбулентному потоці, то анемометр показував певний діапазон швидкостей, тому при обробці результатів дослідження використовувалось середнє значення швидкості повітряного потоку. Розміри кожного бар’єру 10см×10см. Як характерний розмір використано висоту бар’єра H=10 см. Моделювання виконувалося з урахуванням критерію Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_0 H}{\nu}$$

де V_0 – швидкість повітря, виміряна перед бар’єром на висоті 0,5H та відстані H перед бар’єром; H – характерний розмір; ν – кінематичний коефіцієнт в’язкості (ν=15,06·10^{-6} м^2/с, t=20 °С).

При проведенні досліджень число Рейнольдса на моделі було порядку 10^5.

На моделі промислового майданчика формувалась зона пилоутворення з частками пилу до 1 мм. Вугільний пил розташовувався в межах прямокутника (майданчик) за захисним бартером. Температура повітря 20 °С. Попередньо,

зразок вугільного пилу знаходився у сушильній шафі (шафа сушильна, модель 2В-151) при температурі +40 °С протягом 1 год**.** Експеримент здійснювався у три етапи з варіацією швидкості повітряного потоку:

- Етап 1: вимірювання швидкості повітря безпосередньо за захисним бар’єром (на висоті 0,1Н та відстані 0,5Н від бар’єру);
- Етап 2: вимірювання швидкості повітря на різній відстані від захисного бар’єру (на висоті 0,1Н);
- Етап 3: Визначення інтенсивності пилоутворення при використання захисного бар’єру даного типу.

Метою першого етапу досліджень було оцінювання захисної функції бар’єру та отримання даних, що можуть бути використані при побудові чисельної моделі процесу аеродинаміки та масопереносу пилу на промисловому майданчику при використанні захисних бар’єрів з перфорацією.

На наступних рисунках представлено виміряну швидкість повітряного потоку за захисними бар'єрами з різним рівнем пористості. Вимірювання швидкості здійснювалось на висоті 0,1Н.

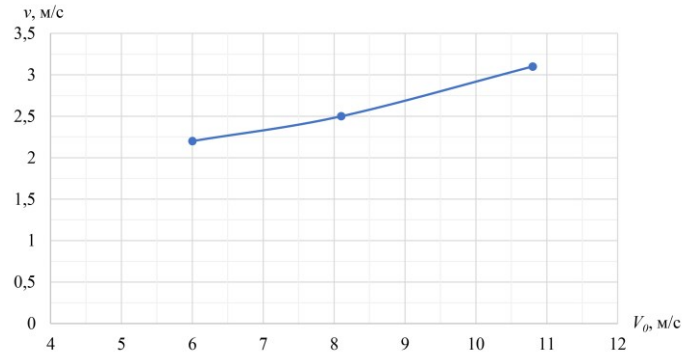


Рисунок 4.4 – Швидкість повітряного потоку за бар’єром (пористість 20 %).

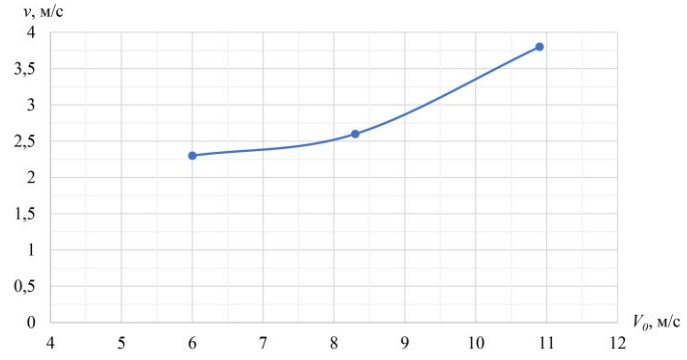


Рисунок 4.5 – Швидкість повітряного потоку за бар’єром (пористість 30 %).

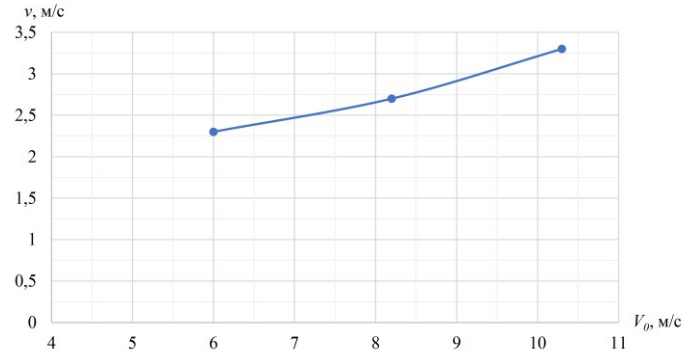


Рисунок 4.6 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (пористість 38 %).

Обробка експериментальних даних, що наведені на рис. 4.4-4.6, дає можливість отримати наступні емпіричні моделі, що можуть використовуватись для оцінки швидкості повітря за відповідним захисним бар'єром (на висоті 0,1H та відстані 0,5H від бар'єру), що має пористість:

1) 20 %:

$$v = 1,4179 \cdot e^{0,0718 \cdot V_0} \text{ м/с;} \quad (4.1),$$

2) 30 %:

$$v = 1,1883 \cdot e^{0,1034 \cdot V_0} \text{ м/с;} \quad (4.2),$$

3) 38 %:

$$v = 1,3796 \cdot e^{0,0839 \cdot V_0} \text{ м/с.} \quad (4.3)$$

В даних залежностях V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром.

Відзначимо, що моделі (4.1)-(4.3) можуть буди використані як для оперативного визначення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром даного типу (на етапі проєктування «фор-ескіз»), так і при побудові чисельної моделі аеродинаміки повітряного потоку на промисловому майданчику при використанні захисних бар'єрів з перфорацією (що зроблено в даному Розділі).

Результати експериментальних досліджень, що наведені на рис. 4.4-4.6 дають можливість визначити таку закономірність: за захисним бар'єрами має місце зменшення швидкості повітряного потоку майже в 3 рази в порівнянні зі швидкістю набігаючого потоку (тобто, швидкістю потоку перед бар'єром).

На поданих рисунках представлено значення швидкості повітряного потоку (на висоті 0,1H) за захисними бар'єрами, розташованими вздовж моделі промислового майданчика.

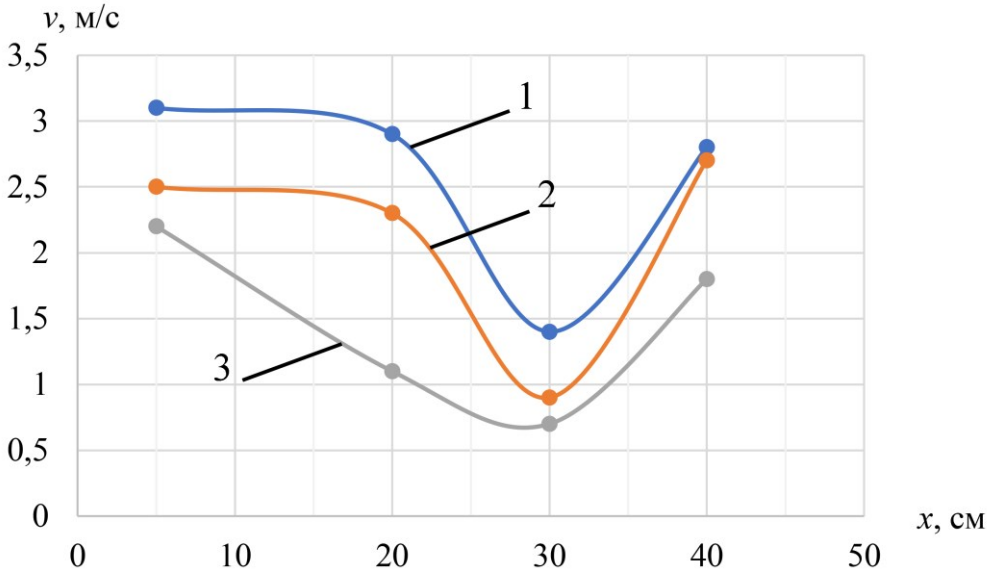


Рисунок 4.7 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (пористість 20 %): 1 – V_0=10,8 м/с; 2 – V_0=8,1 м/с; 3 – V_0=6 м/с.

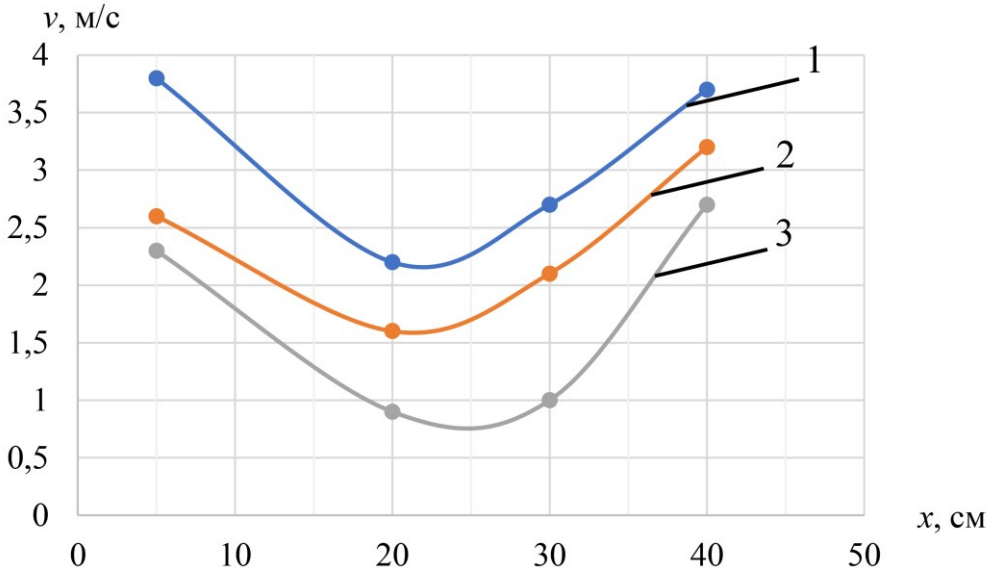


Рисунок 4.8 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (пористість 30 %): 1 – V_0=10,9 м/с; 2 – V_0=8,3 м/с; 3 – V_0=6 м/с.

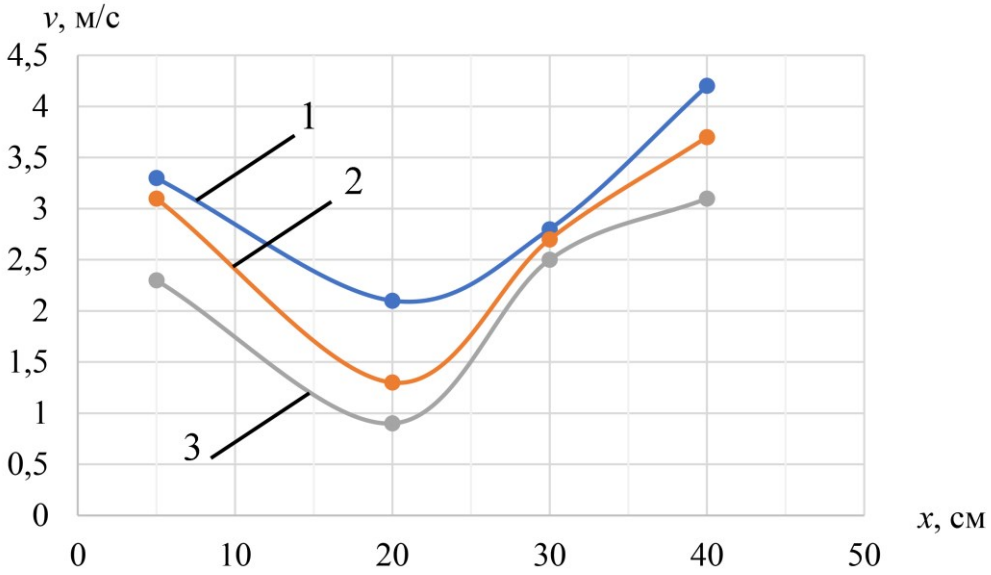


Рисунок 4.9 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (пористість 38 %): 1 – V_0=10,3 м/с; 2 – V_0=8,2 м/с; 3 – V_0=6 м/с.

Результати, наведені на рис. 4.7-4.9, 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 3H від бар'єру;

2) при пористості бар'єру 30 % мінімальна швидкість повітряного потоку фіксується на відстані 2,5H від бар'єру;

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

З рис. 4.9 можна бачити, що мінімальне значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром в 5–6 разів менше, ніж значення швидкості набігаючого потоку повітря. Визначення закономірності зміни локальної швидкості повітряного потоку за перфорованим бар'єром дає можливість визначати місце раціонального розташування бар'єру на промисловому майданчику з умови, що локальна швидкість повітряного потоку менше швидкості, при якій починається пилоутворення. Наприклад, якщо швидкість

повітря, при якій починається пилоутворення (ця швидкість має назву «suspension speed») має значення 2.5 м/с, то захисна функція бар'єру, тобто забезпечення швидкості потоку менше ніж 2.5 м/с, буде мати дію на відстані 2H від перфорованого бар'єру, далі буде зростання швидкості повітряного потоку, що призведе до початку процесу пилоутворення.

На наступному етапі було створено CFD-модель для розрахунку аеродинаміки та розповсюдження пилу на території промислового майданчика із застосуванням захисного бар'єру відповідного типу.

Побудова CFD моделі здійснювалася таким чином, щоб реалізувати наступну процедуру розрахунку:

1. Розрахувати поле швидкостей повітряного потоку на промисловому майданчику при наявності захисного бар'єру даної форми.

2. Розрахувати інтенсивність емісії пилу в залежності від локальної швидкості повітряного потоку над областю пилоутворення та при наявності захисного бар'єру даної форми.

3. Розрахувати поле концентрації пилу на промисловому майданчику, що формується внаслідок конвекції та дифузії при наявності захисного бар'єру даної форми.

Складність вирішення цих завдань полягає в тому, що необхідно проводити розрахунки в області зі складною геометрією.

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

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0 .$$

Граничні умови для рівняння (1) наступні :

1. $\frac{\partial P}{\partial x} = V_{in}$ – на границі входу (V_{in} – відома швидкість потоку повітря на цій границі).

2. $P=P_0$+Const – на границі виходу.

3. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де n – зовнішня нормаль до твердої поверхні.

Особливістю процесу, що моделюється, є те, що потрібно визначити поле швидкості повітряного потоку при наявності перфорованого захисного бар'єру. Це суттєво ускладнює чисельне рішення задачі. Для моделювання впливу бар'єру з перфорацією була розроблена наступна процедура: положення бар'єру з перфорацією задавалося в моделі за допомогою маркерів. Ці маркери на розрахункової сітці були «позначками» для внутрішньої граничної умови Неймана при чисельному інтегруванні рівняння для потенціалу швидкості. Значення швидкості повітряного потоку V_{n} за бар'єром з перфорацією задавалося виходячи з наявних даних, тобто було відоме. Це значення, наприклад, можна було визначити, виходячи з експериментальних даних, що отримані в даному розділі. Далі, там, де розташовувалася область пористості, ставилася умова $\frac{\partial P}{\partial x} = V_{in}$.

Чисельне інтегрування рівняння для потенціалу швидкості, а також подальше розв'язання рівняння масопереносу виконуються на прямокутній різницевій сітці. Для чисельного розв'язання рівняння Лапласа застосовується метод встановлення розв'язку за часом. Для цього це рівняння записується у вигляді [13, 41]:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

де t – фіктивний час.

Далі, значення потенціалу швидкості комірки розраховується за явною формулою:

$$P_{ij}^{n+1} = P_{ij}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{ij}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{ij}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Процес розв'язку припиняється, коли $\left| P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^{n} \right| = \varepsilon$

де n – номер ітерації, ε – мале число.

Значення компонент швидкості повітря розраховується на сторонах кожної комірки:

$$u_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для оцінювання концентрації пилу на промисловому майданчику використовується наступне рівняння масопереносу [22]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + \\ + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \quad (4.4)$$

де C – концентрація пилу в повітрі, u, v – складові вектора швидкості вітру, x_i, y_i – декартові координати джерела викидів, t – час, μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x–x_i)\delta(y–y_i)$ – дельта-функція Дірака, Q – інтенсивність емісії пилу, w – швидкість гравітаційного осадження часток пилу. Коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері були визначені наступним чином:

$$\mu_x = 0{,}1 \cdot u, \ \ \mu_y = 0{,}1 \cdot v.$$

Граничні умови для (4.4) є наступними:

1. На границі входу повітряного потоку: C=0.

2. На границі виходу повітряного потоку: ∂C/∂n=0.

3. На твердих границях і на поверхнях y=0, y=L_y (L_y – верхня межа області):

$$\partial \mathrm{C}/\partial \mathrm{n}=0.$$

Для t=0 початкова умова має вигляд: C=0.

Чисельне інтегрування рівняння масопереносу (4.4) проводилось з використанням різницевих схем та прямокутної сітки. Для формування геометричного вигляду розрахункової області (форма бар’єру, його положення тощо) використовувалися маркери.

Спочатку було виконано розщеплення різницевого рівняння (4.4) наступним чином:

– на *першому кроці* ($k = n + \frac{1}{4}$):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{+}C^{k}+L_{y}^{+}C^{k}\right)=$$
$$=\frac{1}{4}(M_{xx}^{+}C^{k}+M_{xx}^{-}C^{n}+M_{yy}^{+}C^{k}+M_{yy}^{-}C^{n})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \quad (4.5)$$

– на *другому кроці* ($k=n+\frac{1}{2}, c=n+\frac{1}{4}$):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{-}C^{k}+L_{y}^{-}C^{k}\right)=$$
$$=\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{k}+M_{xx}^{+}C^{c}+M_{yy}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \quad (4.6)$$

– на *третьому кроці* ($k=n+\frac{3}{4}, c=n+\frac{1}{2}$):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{+}C^{k}+L_{y}^{-}C^{k}\right)=$$
$$=\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{c}+M_{xx}^{+}C^{k}+M_{yy}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \quad (4.7)$$

– на *четвертому кроці* ($k=n+1, c=n+\frac{3}{4}$):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{-}C^{k}+L_{y}^{+}C^{k}\right)=$$
$$=\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{k}+M_{xx}^{+}C^{c}+M_{yy}^{-}C^{c}+M_{yy}^{+}C^{k})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \quad (4.8)$$

Тут та далі приймається *v*=*v*–*w*. Значення різницевих операторів $L_{x}^{+}, L_{x}^{-}, L_{y}^{+}...$ наведені в [41].

З наведених різницевих рівнянь концентрація пилу на верхньому часовому шарі обчислюється за допомогою явної формули «рухомого рахунку». Початкову умову для цих рівнянь представлено у такій формі:

$$C^{1}\Big| = C\left(x,y,t^{n}\right), C^{k}\Big| = C^{k-1}\Big|.$$

Гранична умова на твердих стінках має вигляд:

$$\frac{\partial C}{\partial n}=0.$$

На основі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерний код,

написаний мовою програмування FORTRAN.

Склад комп'ютерного коду:

– Q52T.DAT – файл даних для розрахунку 2D концентраційного поля на промисловому майданчику при наявності захисного бар'єру з перфорацією;

– Q52T1 – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE», явна різницева схема);

– Q52T*2* – розрахунок 2D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q52T3 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q52T4 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q52T5 – розрахунок 2D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику при наявності захисного бар'єру з перфорацією (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Введення початкових даних (місце розташування бар'єру з перфорацією, розміри захисного бар'єру і т. д.)

2. Рішення 2D чисельної моделі аеродинаміки.

3.Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів.

4. Рішення 2D чисельної моделі масопереносу.

5. Виведення «на друк» поля концентрації пилу на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні такі дані:

1. Геометрична форма захисного бар'єру (значення пористості).

2. Розміри захисного бар'єру.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення.

4. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

7. Крок за часом.

8. Розміри 2D розрахункової сітки.

9. Розміри 2D розрахункової області

Особливості розробленої 2D CFD моделі:

1. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для будь-якої кількості захисних бар'єрів даної форми (бар'єри з перфорацією).

2. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для різноманітних розмірів бар'єру, без обмежень.

3. Можливість рішення 2D задачі масопереносу при будь-якій формі поверхні пилоутворення та при будь-якому її розташуванні відносно захисного бар'єру.

4. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення (наприклад, користувач задає математичну залежність інтенсивності пилоутворення при різній локальній швидкості повітряного потоку або задає інтенсивність такої емісії як «константу» при дефіциті даних відносно цього параметру та використанні літературних джерел).

5. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення в залежності від різної локальної швидкості повітряного потоку над поверхнею пилоутворення.

Нижче на рисунках показано результати комп'ютерного моделювання процесу переносу пилу на промисловому майданчику при розташуванні бар'єру даного типу. Розрахунок здійснювався при таких параметрах:

1. Розміри розрахункової області 25 м× 10,5 м.
2. Розмір розрахункової сітки 25 × 21 контрольний елемент.
3. Швидкість вітру 4 м/с.
4. Довжина області пилоутворення 6 м.
5. Інтенсивність пилоутворення 100 од (в безрозмірному вигляді).

6. Ширина бар’єру 1 м.
7. Висота бар’єру 5 м
8. Пористість бар’єру 38 %.
9. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,001 м/с .

Схема розрахункової області показана на рис. 4.10.

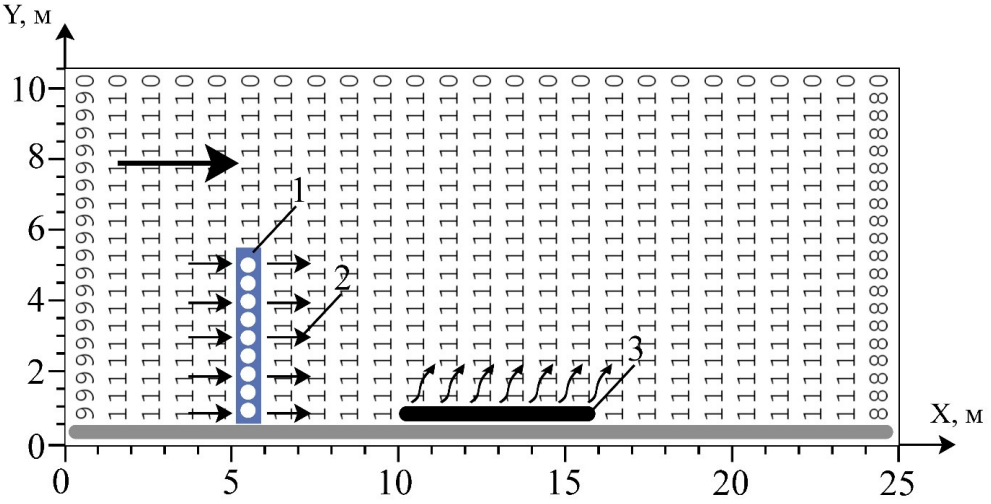
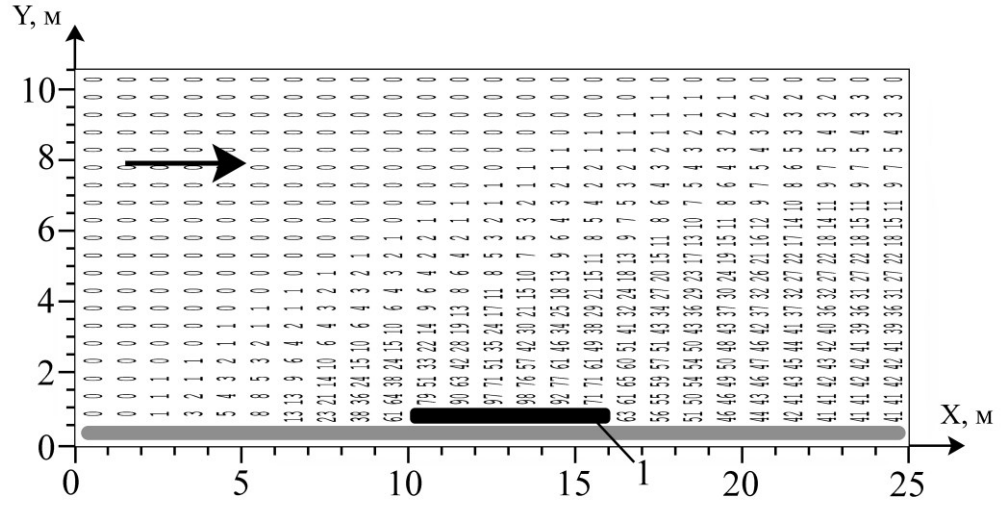
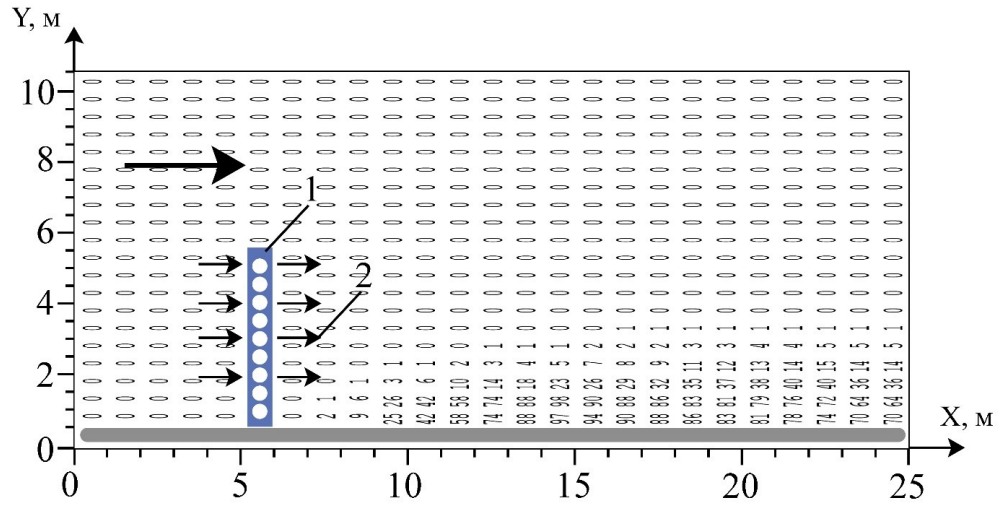


Рисунок 4.10 – Схема розрахункової області: 1 – бар’єр з перфорацією; 2 – потік крізь бар’єр; 3 – область пилоутворення.

На рисунку нижче представлено поле концентрації пилу в досліджуваній області. Концентрація пилу подана у відносних одиницях: кожне число виражає значення концентрації у відсотках від її максимального значення. Отже, числу «99» відповідає максимальна концентрація пилу. Якщо, наприклад, число на матриці дорівнює «14», то це означає, що концентрація пилу в даному контрольному елементі дорівнює 14 % від максимального значення концентрації. Друк результатів здійснено в формате INTEGER, тобто на друк виводиться лише ціле значення дійсного числа. Такий друк результатів комп’ютерного моделювання дає можливість дуже швидко здійснити аналіз області забруднення та виявити області, де має місце суттєве пилове забруднення повітря на промисловому майданчику.



а)



б)

Рисунок 4.11 – 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. 4.11а, показує, що за відсутності захисного бар’єру утворюється значна за висотою зона пилового забруднення. У свою чергу, дані, представлені на рис. 4.11б, 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.

4.2 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні частково перфорованих бар'єрів

Далі, на рисунках наведено результати експериментальних досліджень при використанні захисного напівпроникного бар'єру з перфорацією в верхній частині бар'єру (рис. 4.12, пористість 22,8 %).

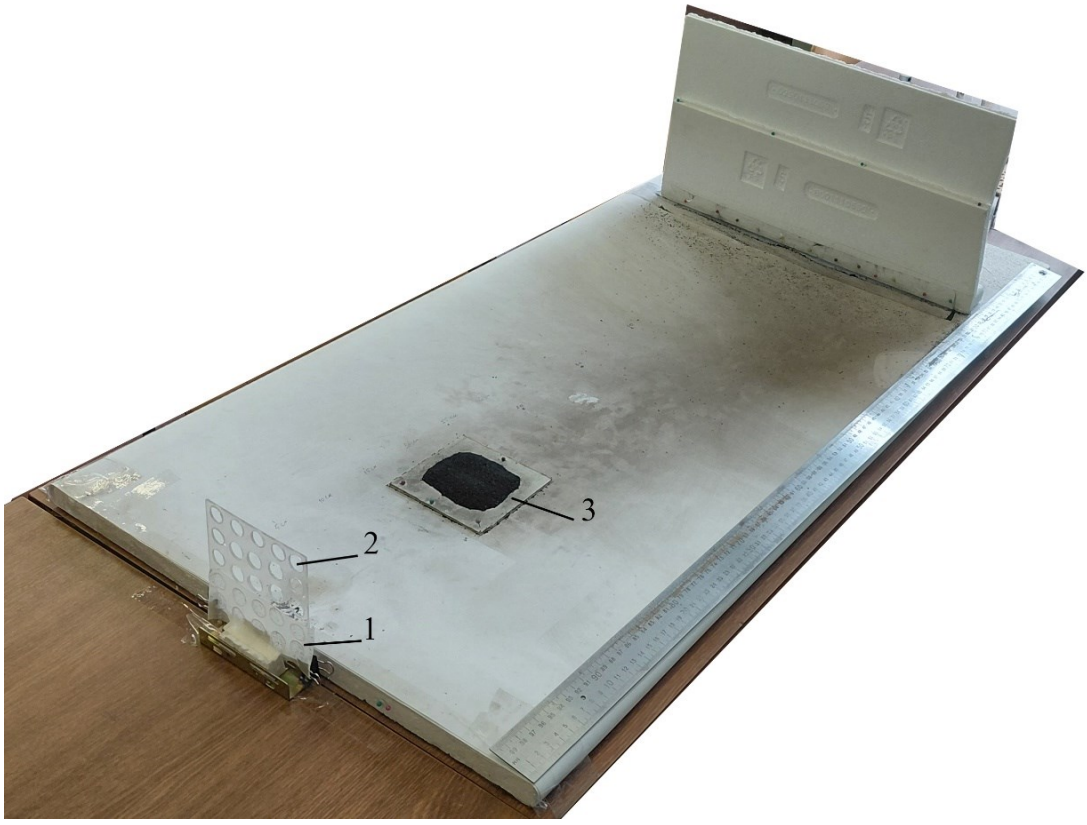


Рисунок 4.12 – Фото експериментальної установки (напівпроникний бар'єр, перфорація зверху): 1 – частина бар'єру без перфорації; 2 – частина бар'єру з перфорації.

На рис. 4.13 наведені експериментальні дані щодо швидкості повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5H (H – висота бар'єру) та на висоті 0,1H.

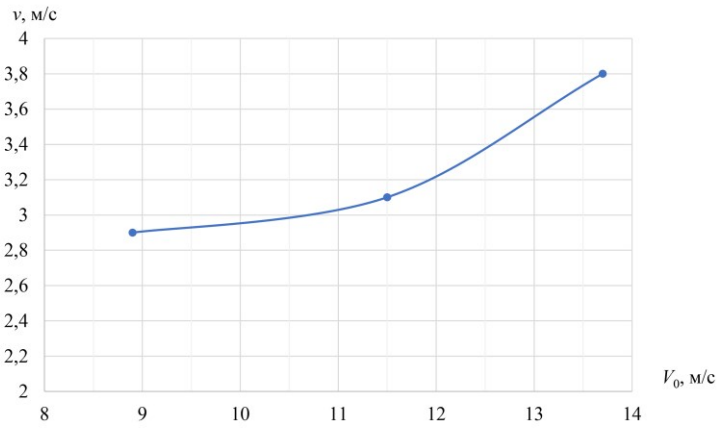


Рисунок 4.13 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром.

Апроксимація результатів експерименту дає змогу побудувати емпіричну модель для визначення швидкості повітряного потоку за бар'єром даного типу:

$$v = 1,7288 \cdot e^{0,0554 \cdot V_0} \text{ м/с}, \qquad (4.9)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром; v – швидкість повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5H (H – висота бар'єру) та на висоті 0,1H.

На рис. 4.14 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1H вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед бар'єром.

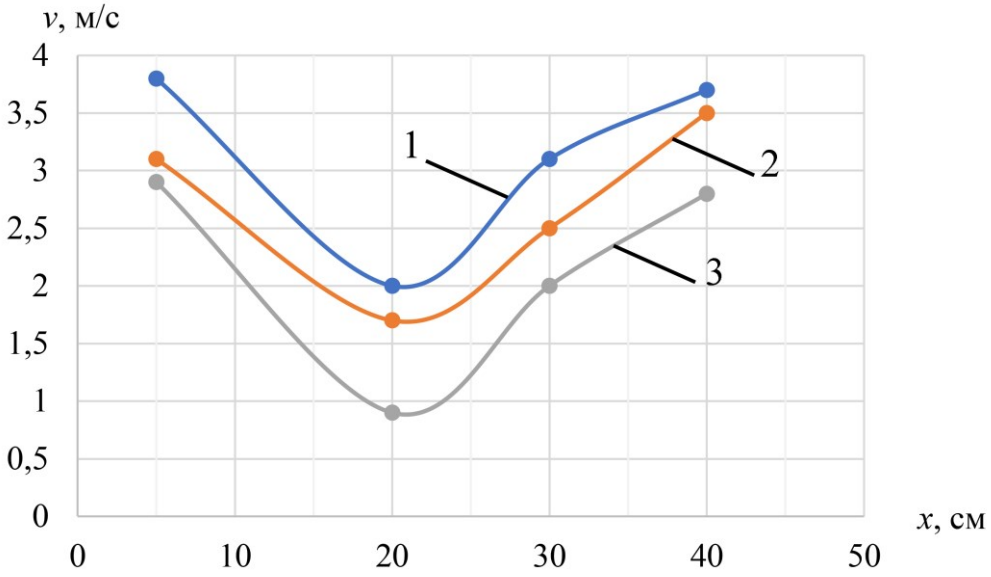


Рисунок 4.14 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром вздовж моделі промислового майданчику: 1 – V_0=13,7 м/с; 2 – V_0=11,5 м/с; 3 – V_0=8,9 м/с.

Результати, наведені на рис. 4.14, показують, що на ділянці (0,5÷2)H спостерігається зменшення швидкості повітряного потоку.

Як можна бачити на рис. 4.14, збільшення швидкості повітряного потоку починається на відстані від 2H, тобто, починаючи з цієї відстані з'являється ризик пилоутворення. Як наведено в Розділі 3, початок пилоутворення починається з локальної швидкості повітря близько 4 м/с.

На рис. 4.15 показано інтенсивність виносу вугільного пилу з промислового майданчика при використанні захисного бар'єру **даного типу** (ділянки розміром 0,6H×0,6H, початок якої розташований на відстані 2H від бар'єру та на висоті 0,1H, H – висота бар'єру).

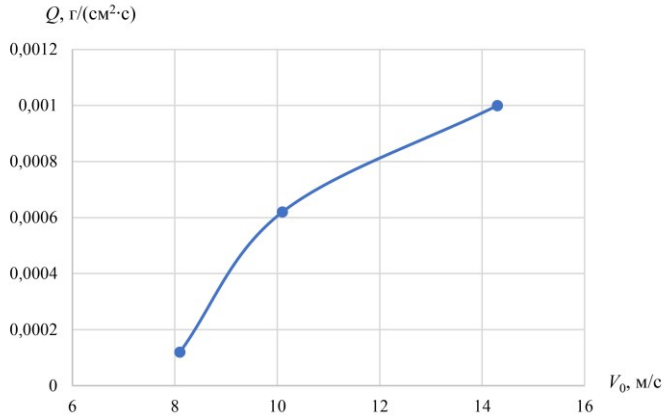


Рисунок 4.15 – Інтенсивність емісії вугільного пилу при різній швидкості повітряного потоку (непроникний бар'єр знизу).

Апроксимація результатів експерименту дає можливість отримати наступну емпіричну модель для визначення інтенсивності виносу вугільного пилу від забрудненої ділянки:

$$Q = 0,0015\ln(V_0) - 0,003 \text{ , г/(см}^2\text{·с)} \qquad (4.10)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром; Q – інтенсивність виносу вугільного пилу з ділянки розміром 0,6H×0,6H, початок якої розташований на відстані 2H від бар'єру та на висоті 0,1H, H – висота бар'єру.

Проведений експеримент дає можливість визначити наступну закономірність для бар'єру даного типу – формується зона пилового забруднення

за бар’єром, перед дослідною ділянкою, де розташоване вугілля (зона 3 на рис. 4.16, «стрілка» показує напрям руху повітряного потоку).

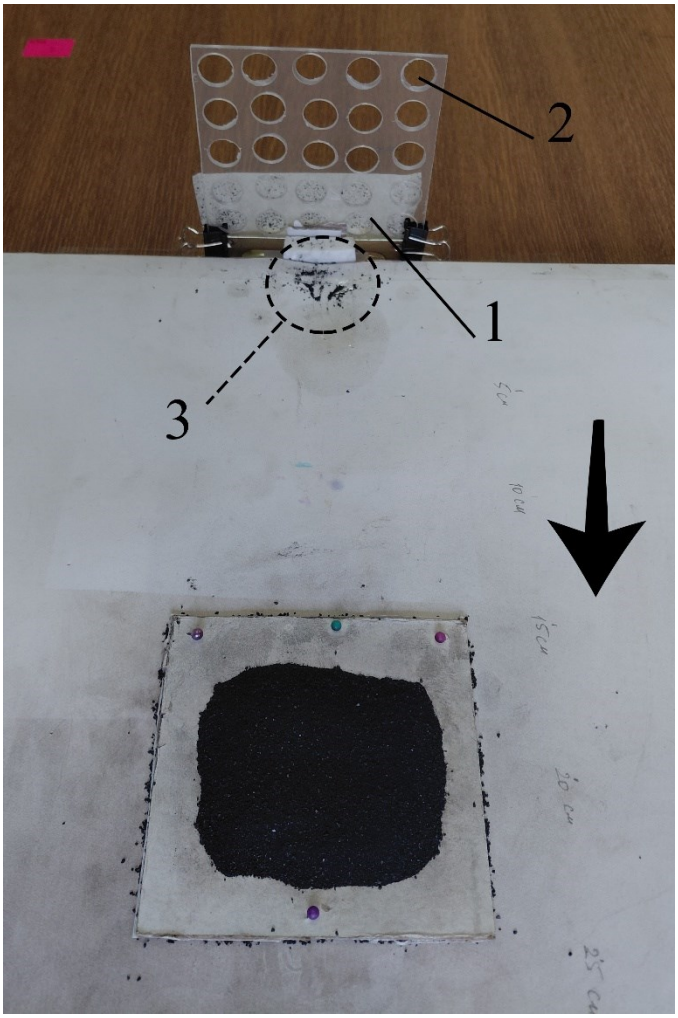


Рисунок 4.16 – Зона забруднення за бар’єром.

Таким чином, аеродинаміка повітряних струменів при використанні даного типу бар’єру сприяє негативній появі забруднення повітря та підстильної поверхні безпосередньо за бар’єром. Слід зазначити, що поява такого забруднення поза основною областю розташування вугілля створює загрозу появи «вторинного» забруднення повітря на промисловому майданчику, а саме, підняття в повітря вугілля з цієї зони при зміні напрямку вітру.

Далі на рисунка наведено результати експериментальних досліджень при використанні захисного напівпроникного бар’єру з перфорацією в нижній частині (пористість 22,8 %).

На рис. 4.17 показано фото експериментальної установки.

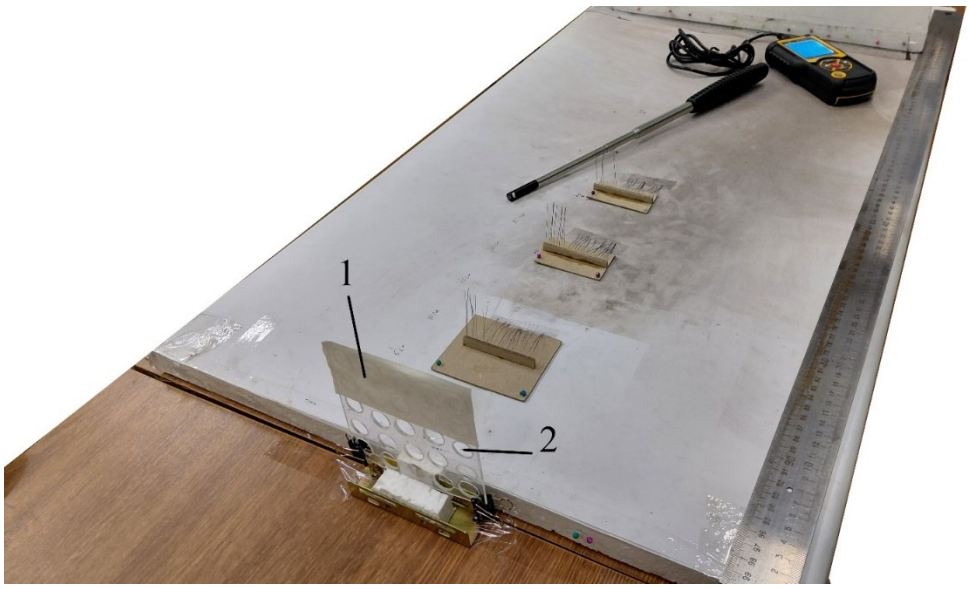


Рисунок 4.17 – Фото експериментальної установки (напівпроникний бар'єр, перфорація знизу): 1 – непроникна часина захисного бар'єру; 2 – область перфорації.

На рис. 4.18 наведені експериментальні дані щодо швидкості повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5H (H – висота бар'єру) та на висоті 0,1H.

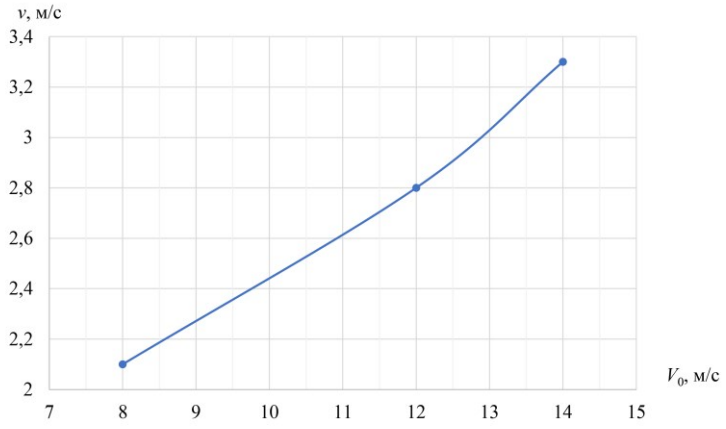


Рисунок 4.18 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром.

Апроксимація результатів експерименту дає змогу побудувати емпіричну модель для визначення швидкості повітряного потоку за бар'єром даного типу:

$$v = 1{,}1506 \cdot e^{0{,}0748 \cdot V_0}, \text{ м/с} \qquad (4.11)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром; v – швидкість повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5Н (Н – висота бар'єру) та на висоті 0,1Н.

Далі, на рис. 4.19 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1Н вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед бар'єром.

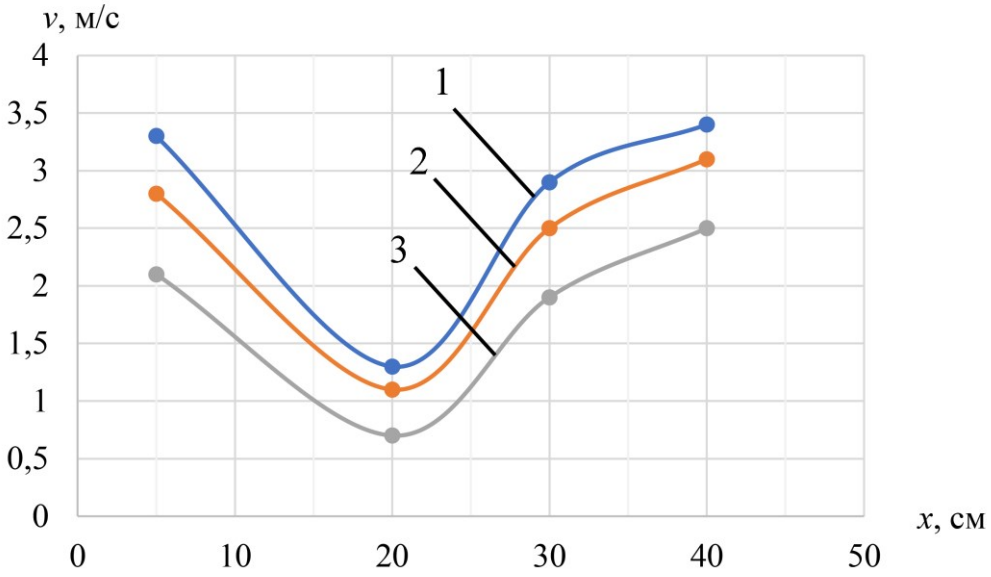


Рисунок 4.19 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром вздовж моделі промислового майданчику: 1 – V_0=14 м/с; 2 – V_0=12 м/с; 3 – V_0=8 м/с.

Результати, що наведені на рис. 4.19, показують, що на ділянці (0,5÷2)Н також спостерігається зменшення швидкості повітряного потоку.

Як можна бачити на рис. 4.19, збільшення швидкості повітряного потоку починається на відстані від 2Н, тобто, починаючи з цієї відстані з'являється ризик інтенсивного пилоутворення. Як наведено в Розділі 3, початок пилоутворення починається з локальної швидкості повітря близько 4 м/с.

На рис. 4.20 показано інтенсивність виносу вугільного пилу з промислового майданчика при використанні захисного бар'єру **даного типу (** висота вугілля на ділянці 0,1Н, ділянка розміром 0,6Н×0,6Н, початок якої розташований на відстані 2Н від бар'єру, Н – висота бар'єру) .

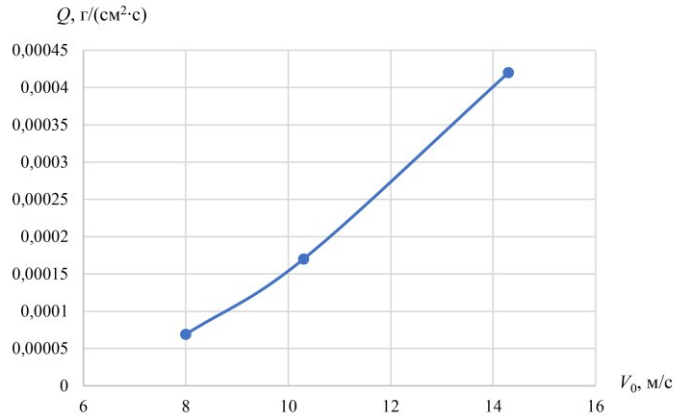


Рисунок 4.20 – Інтенсивність емісії вугільного пилу при різній швидкості повітряного потоку (непроникний бар'єр зверху).

Апроксимація результатів експерименту дає можливість отримати наступну емпіричну модель для визначення інтенсивності виносу вугільного пилу від забрудненої ділянки при використанні захисного бар'єру даного типу:

$$Q = 8 \cdot 10^{-6} e^{0,2799 \cdot V_0}, \text{ г/(см}^2\text{·с)} \qquad (4.12)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром; Q – інтенсивність виносу вугільного пилу з ділянки.

Для кількісного аналізу та порівняння ефективності використання кожного типу частково перфорованого бар'єру, з точки зору зменшення пилоутворення, на рис. 4.21 показано інтенсивність виносу вугільного пилу для кожного типу бар'єру (перфорований знизу бар'єр та перфорований зверху бар'єр).

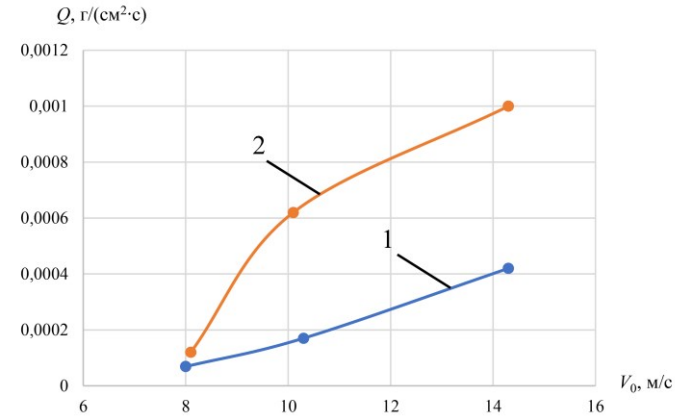


Рисунок 4.21 – Інтенсивність виносу вугільного пилу для кожного типу бар'єру: 1 – бар'єр з перфорацією знизу; 2 – бар'єр з перфорацією зверху.

Результати, що наведено на рис. 4.21, свідчать про те, що інтенсивність виносу вугільного пилу 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. Для рішення задачі аеродинаміки використовувалося рівняння для потенціалу швидкості (рівняння Лапласа), яке приводилося до вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{4.13}$$

де t – фіктивний час. При $t \to \infty$ розв'язок (4.13) буде прагнути до «сталого» розв'язку, тобто до розв'язку рівняння Лапласа для потенціалу швидкості.

На наступному кроці здійснюється геометричне розщеплення рівняння (4.13) таким чином:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{4.14}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \tag{4.15}$$

Далі для визначення невідомого значення P на базі рівняння (4.14) використовується така залежність:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Для визначення невідомого значення P на базі рівняння (4.15) застосовується залежність :

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Обчислення закінчуються, коли виконується наступна умова:

$$\left| P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число (ε=0,001), n – номер ітерації.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості розраховувались складові вектора швидкості повітряного потоку за залежностями:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для моделювання процесу переносу пилу використовувалося рівняння (4.4) та різницева схема, що описана вище.

Далі, на рисунках представлено результати комп’ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при розташуванні бар’єру даного типу. Розрахунок здійснювався при наступних параметрів:

1. Розміри розрахункової області 25 м× 10.5 м.
2. Розмір розрахункової сітки 25 × 21 контрольний елемент.
3. Швидкість вітру 4 м/с.
4. Довжина області пилоутворення 6 м.
5. Інтенсивність пилоутворення 100 од. (в безрозмірному вигляді).
6. Ширина бар’єру 10 м.
7. Висота бар’єру 5 м
8. Пористість 22,8 %.
9. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,002 м/с .

Схема розрахункової області показана на рис. 4.22.

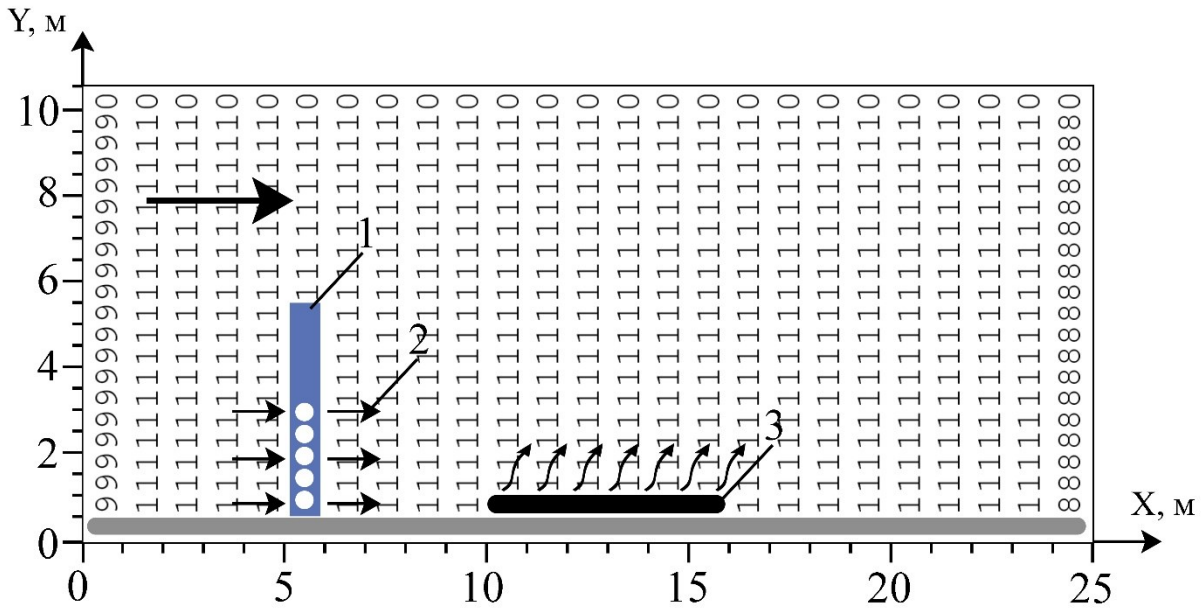


Рисунок 4.22 – Схема розрахункової області: 1 – бар’єр з частковою перфорацією; 2 – потік крізь бар’єр; 3 – область пилоутворення.

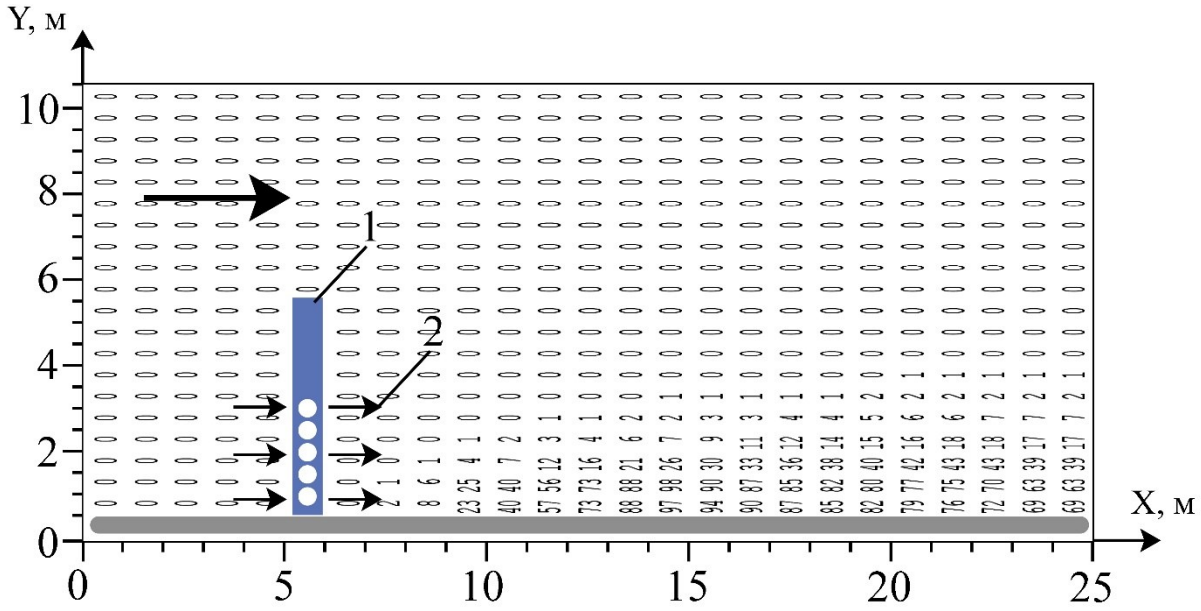


Рисунок 4.23 – Концентрація пилу на промисловому майданчику: 1 – бар’єр з частковою перфорацією; 2 – потік крізь бар’єр.

Аналіз даних, представлених на рис. 4.23, 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.

4.3 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні частково перфорованих бар'єрів складної форми

На наступному етапі досліджень здійснювався аналіз аеродинаміки повітряного потоку при використанні Г-подібного, напівпроникного бар'єру з перфорацією знизу, пористість 22,8 % (рис. 4.24). Розташування горизонтального елементу на бар'єрі – «по потоку».

Висота бар'єру H=10 см, довжина додаткового елементу 5 см (0.5 H).

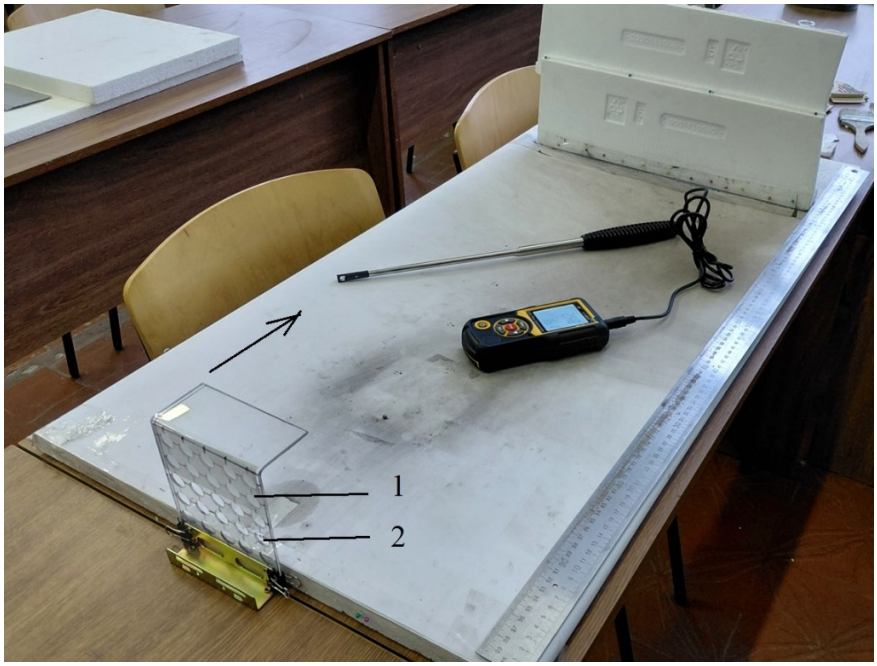


Рисунок 4.24 – Фото експериментальної установки (Г-подібний, напівпроникний бар'єр, перфорація знизу, розташування додаткового елементу «по потоку»): 1 – непроникна частина захисного бар'єру; 2 – область перфорації.

На рис. 4.25 наведені експериментальні дані щодо швидкості повітряного потоку за бар'єром даного типу на відстані 0,5H (H – висота бар'єру) та на висоті 0,1H.

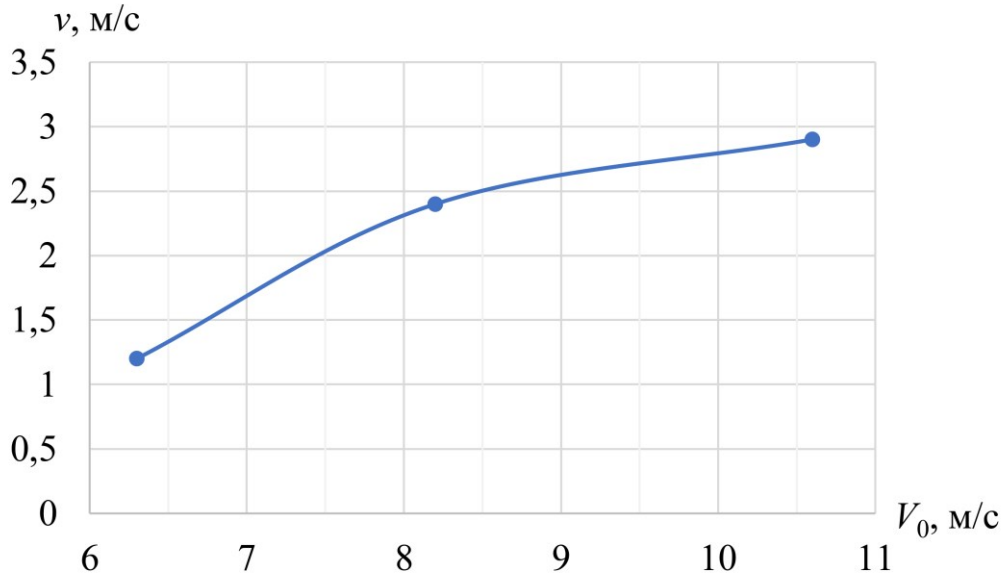


Рисунок 4.25 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (Г-подібний, напівпроникний бар'єр, перфорація знизу, розташування додаткового елементу – «по потоку»).

Апроксимація результатів експерименту дає змогу побудувати емпіричну модель для визначення швидкості повітряного потоку за бар'єром даного типу при орієнтації додаткового горизонтального елементу «по потоку»:

$$v = -0,0984 \cdot V_0^2 + 2,0588 \cdot V_0 - 7,8638, \qquad (4.16)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром; v – швидкість повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5H (H – висота бар'єру) та на висоті 0,1H.

Далі, на рис. 4.26 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1H вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед бар'єром

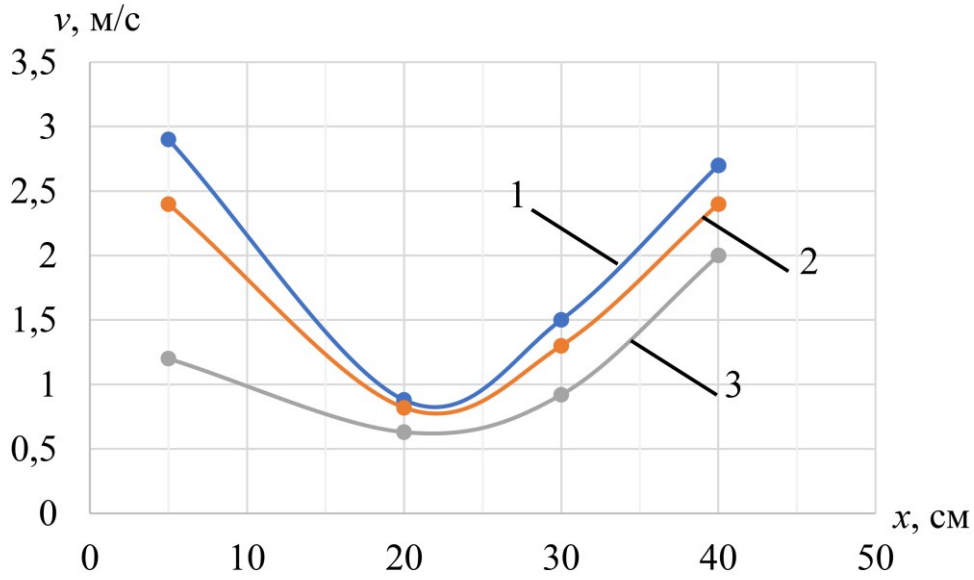


Рисунок 4.26 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром вздовж моделі промислового майданчику (Г-подібний, напівпроникний бар'єр, перфорація знизу, розташування додаткового елементу – «по потоку»): 1 – V_0=10,6 м/с; 2 – V_0=8,2 м/с; 3 – V_0=6,3 м/с.

Результати, що наведені на рис. 4.26, показують, що швидкість повітряного потоку досягає мінімального значення на відстані 2H від захисного бар'єру.

Якщо порівняти експериментальні дані, що наведені на рис. 4.26 та рис. 4.19, 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).

Далі, було проведено експеримент по аналізу аеродинаміки повітряного потоку при використанні Г-подібний, напівпроникного бар'єру, перфорація знизу, пористість 22,8 % (рис.4.27). Розташування горизонтального елементу на бар'єрі – «проти потоку».



Рисунок 4.27 – Фото експериментальної установки (Г-подібний, напівпроникний бар’єр, перфорація знизу, розташування додаткового елементу – «проти потоку»): 1 – непроникна частина захисного бар’єру; 2 – область перфорації.

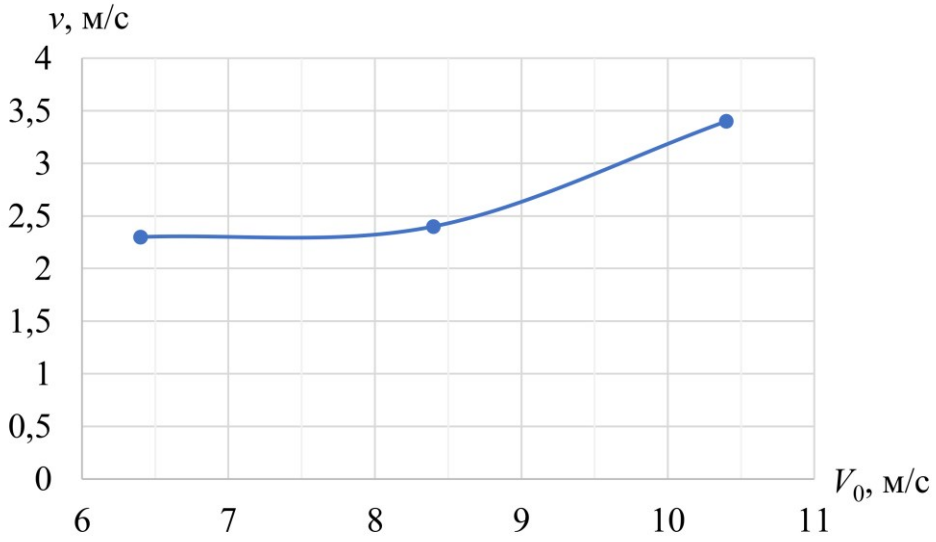


Рисунок 4.28 – Швидкість повітряного потоку за бар’єром (Г-подібний, напівпроникний бар’єр, перфорація знизу, розташування додаткового елементу – «проти потоку»).

Якщо порівняти експериментальні дані, що наведені на рис. 4.28 та рис. 4.26 (тобто при різній орієнтації додаткового горизонтального елементу: «по потоку» або «проти потоку»), то проведений експеримент дає можливість зробити висновок – характер зміни швидкості повітряного потоку, безпосередньо за бар'єром, для кожного сценарію суттєво різний. Виявлена така закономірність:

1. При орієнтації додаткового горизонтального елемента «по потоку» функціональна залежність локальної швидкості повітряного потоку в залежності від швидкості набігаючого повітряного потоку має «випуклість» зверху.

2. При орієнтації додаткового горизонтального елемента «проти потоку» функціональна залежність локальної швидкості повітряного потоку в залежності від швидкості набігаючого повітряного потоку має «увігнутість» знизу.

Апроксимація результатів експерименту дає змогу побудувати емпіричну модель для визначення швидкості повітряного потоку за бар'єром даного типу при орієнтації додаткового горизонтального елементу «проти потоку»:

$$v = 0{,}1125 \cdot V_0^2 - 1{,}615 \cdot V_0 + 8{,}028 \qquad (4.17)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром; v – швидкість повітряного потоку за бар'єром на відстані 0,5H (H – висота бар'єру) та на висоті 0,1H.

Далі, на рис. 4.29 показано зміну швидкості повітряного потоку на висоті 0,1H вздовж промислового майданчика при різній швидкості повітряного потоку перед бар'єром даного типу.

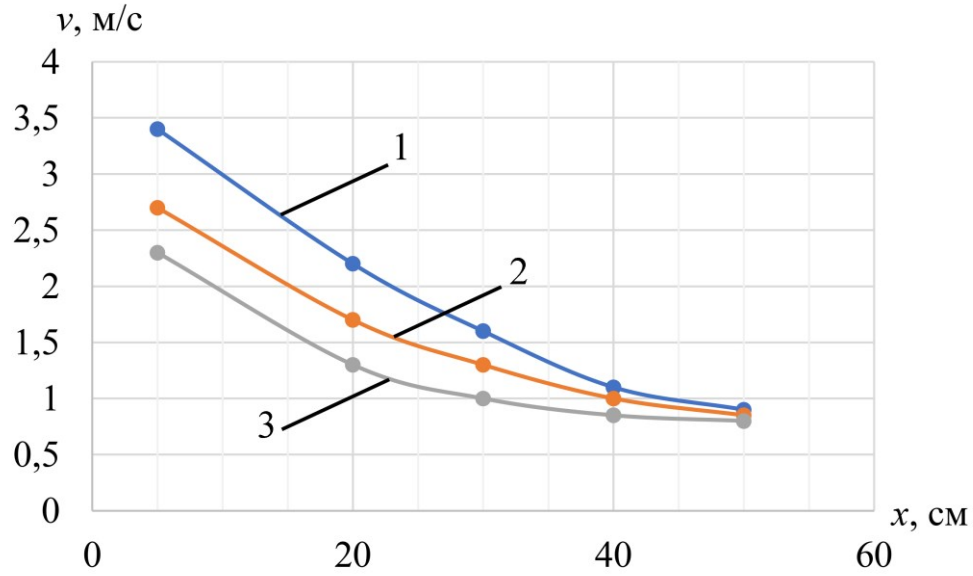


Рисунок 4.29 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром вздовж моделі промислового майданчику («Г»-подібний, напівпроникний бар'єр, перфорація знизу, розташування додаткового елементу - «проти потоку»):
1 – V_0=10,4 м/с; 2 – V_0=8,4 м/с; 3 – V_0=6,4 м/с.

Результати, що наведені на рис. 4.29, показують, що швидкість повітряного потоку досягає мінімального значення на відстані 5H від захисного бар'єру.

Якщо порівняти експериментальні дані, що наведені на рис. 4.29 (розташування додаткового елементу «проти потоку»), та дані, що наведені на рис. 4.26 (розташування додаткового елементу «по 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 2H 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»: 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 захисного бар'єру даного типу. Для рішення задачі аеродинаміки використовувалась модель потенціального руху (рівняння Лапласа для потенціалу швидкості) та двовимірне рівняння масопереносу, що розглянуто раніше.

Для чисельного рішення рівняння Лапласа використовувався метод Лібмана. В цьому випадку різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0.$$

Значення потенціалу швидкості в центрах різницевих комірок визначається так:

$$P_{i,j} = \left[\frac{P_{i+1,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} \right] \Big/ Z \quad ,$$

де $Z = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} \right)$.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості розраховували складові вектора швидкості повітряного потоку за залежностями :

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для побудови різницевої схеми для рішення рівняння масопереносу здійснювалося таке фізичне розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right).$$

Перше рівняння із цієї системи – це рівняння конвективного переносу, друге рівняння – рівняння дифузії.

Для чисельного інтегрування рівняння переносу пилу здійснювалися таки перетворення:

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^{+}C}{\partial x} + \frac{\partial u^{-}C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^{+}C}{\partial y} + \frac{\partial v^{-}C}{\partial y},$$

$$u^{+} = \frac{u + |u|}{2}, u^{-} = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^{+} = \frac{v + |v|}{2}, v^{-} = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}C}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j} C^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j} C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x} C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}C}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j} C^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j} C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x} C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{+}C}{\partial y} \approx \frac{v^{+}_{i,j+1} C^{n+1}_{i,j} - v^{+}_{i,j} C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y} C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{-}C}{\partial y} \approx \frac{v^{-}_{i,j+1} C^{n+1}_{i,j+1} - v^{-}_{i,j} C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y} C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу пилу записується так:

– на першому кроці:

$$\frac{C^{k}_{i,j} - C^{n}_{i,j}}{\Delta t} + L^{+}_{x} C^{k} + L^{+}_{y} C^{k} = 0;$$

– на другому кроці:

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{k}_{i,j}}{\Delta t} + L^{-}_{x} C^{n+1} + L^{-}_{y} C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення *C* у кожному рівнянні визначається за формулою «рухомого рахунку».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується двоетапна різницева схема розщеплення (схема умовної апроксимації), яка має вигляд :

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

На основі створеної чисельної моделі було розроблено комп'ютерний код, реалізований мовою програмування FORTRAN.

Склад комп’ютерного коду :

– Q56T.DAT – файл даних для розрахунку 2D концентраційного поля на промисловому майданчику при наявності захисного бар’єру з пористістю та додатковим елементом;

– Q56T1 – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE», схема Лібмана);

– Q56T*2* – розрахунок 2D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q56T3 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q56T4 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q56T5 – розрахунок 2D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику при наявності захисного бар’єру з пористістю (підпрограма типу «SUBROUTINE»).

Для проведення комп’ютерного експерименту потрібні такі дані:

1. Геометрична форма захисного бар’єру (значення пористості, розміри та положення додаткового елементу).

2. Розміри захисного бар’єру.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення.

4. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

7. Крок за часом.

8. Розміри 2D розрахункової сітки.

9. Розміри 2D розрахункової області

Далі, на рисунках представлені результати комп’ютерного експерименту на базі побудованої CFD моделі по визначенню інтенсивності пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при розташуванні бар’єру даного типу. Розрахунок здійснювався при таких параметрах:

1. Розміри розрахункової області 25 м× 10,5 м.
2. Розмір розрахункової сітки 25 × 21 контрольний елемент.
3. Швидкість вітру 4 м/с.
4. Довжина області пилоутворення 6 м.
5. Інтенсивність пилоутворення 100 од. (в безрозмірному вигляді).
6. Ширина бар’єру 10 м.
7. Висота бар’єру 5 м
8. Довжина горизонтального елементу 2 м.
9. Пористість 22,8 %.
10. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,001 м/с .

Схема розрахункової області показана на рис. 4.30.

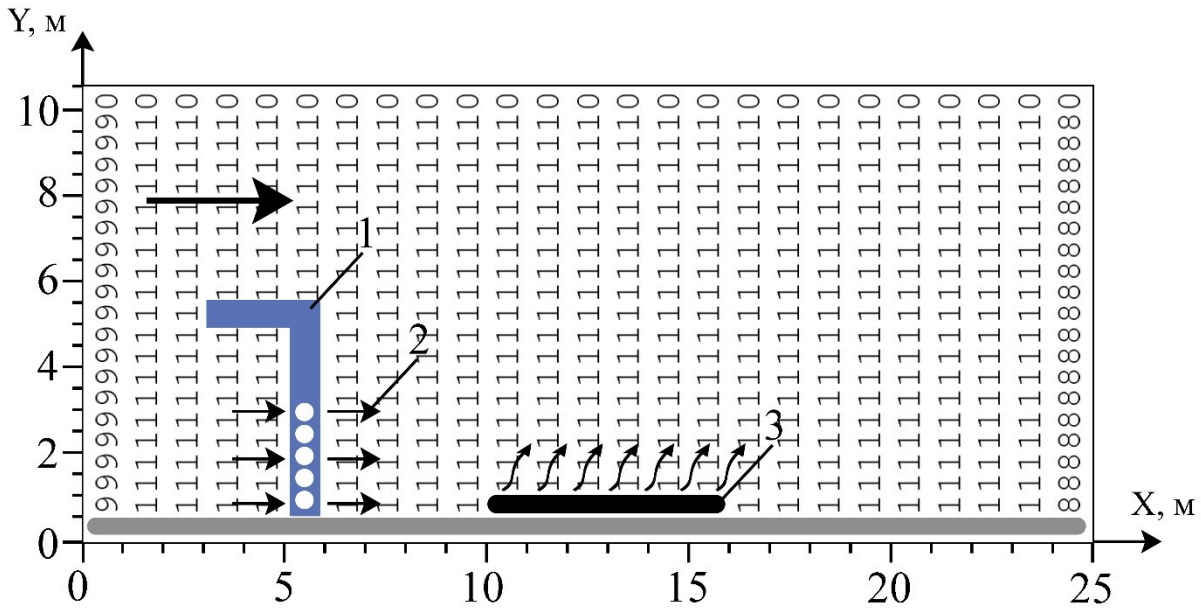


Рисунок 4.30 – Схема розрахункової області: 1 – Г-подібний напівпроникний бар’єр з додатковим елементом «проти потоку»; 2 – потік через бар’єр; 3 – область пилоутворення.

Результати комп’ютерного моделювання показані на рис. 4.31.

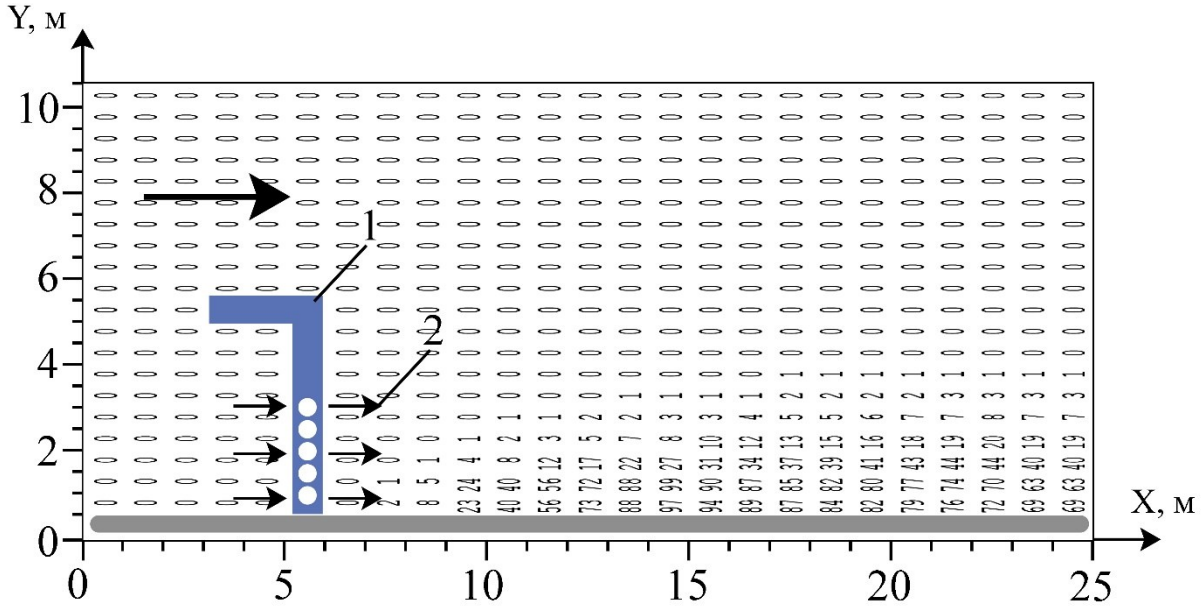


Рисунок 4.31 – Концентрація пилу на промисловому майданчику: 1 – Г-подібний напівпроникний бар’єр з додатковим елементом «проти потоку»; 2 – потік через бар’єр.

Аналіз даних, представлених на рис. 4.31, 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 1-3 % від максимальної, тобто пиловий шлейф щільно прилягає до поверхні землі.

На завершення слід вказати, що вартість перфорованих бар'єрів не є високою, наприклад, перфоровані бар'єри компанії Ніка коштують порядку 3000 грн за 1м^2, перфоровані бар'єри компанії ГДК коштують порядку 2000 грн за 1м^2.

Висновки до розділу 4

1. Результати експериментальних досліджень показали, що використання захисних бар'єрів з перфорацією дає можливість зменшити швидкість повітряного потоку на певних ділянках промислових майданчиків, що сприяє зменшенню інтенсивності пилоутворення на промисловому майданчику.

2. Експериментальним шляхом встановлено закономірності щодо розподілу приземної швидкості повітряного потоку за захисними бар'єрами даної форми; дана інформація може бути використана для обґрунтування місця розташування захисного бар'єру відносно області пилоутворення.

3. На основі отриманих експериментальних даних побудовані емпіричні моделі, що можуть бути використані при інженерних розрахунках по визначенню раціонального місця розташування захисних бар'єрів з перфорацією.

4. Розроблені CFD моделі дають можливість визначати закономірності розподілу концентрації пилу в робочих зонах на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів з перфорацією; побудовані моделі враховують геометричну форму захисних бар'єрів, метеоумови, інтенсивність пилоутворення, що залежить від величини локальної швидкості повітряного потоку на

промисловому майданчику; результати комп’ютерних експериментів на базі розроблених моделей дають можливість швидко визначати ефективність їх використання.

5. Розроблені CFD моделі відносяться до класу «operational models» та призначені для швидкого оцінювання ефективності захисних бар’єрів на етапі проєктування «фор-ескіз».

6. Особливістю розроблених CFD моделей є можливість проведення розрахунків в областях, що мають складну геометричну форму; для практичної реалізації побудованих моделей використовуються типові вхідні дані, що є важливим при проведені комплексу досліджень, коли розглядаються різні сценарії організації захисту повітря від пилового забруднення.

7. Результати комп’ютерних експериментів показують, що запропоновані CFD моделі представляють сучасний інструмент проведення складних наукових досліджень в галузі охорони праці.

РОЗДІЛ 5
ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІКИ ПОВІТРЯНОГО ПОТОКУ НА ПРОМИСЛОВОМУ МАЙДАНЧИКУ ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЗАХИСНОГО БАР'ЄРУ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

У цьому розділі представлено результати експериментальних досліджень аеродинаміки повітряного потоку на промисловому майданчику із застосуванням наступних захисних бар'єрів:

1) бар'єр, що має криволінійну форму;

2) бар'єр, що має додатковий елемент у вигляді «шафи»;

3) бар'єр, що має додаткові елементи у вигляді «сходинок».

В розділі побудовано CFD моделі, що дають можливість прогнозувати рівень пилового забруднення робочих зон на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів даної форми.

5.1 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні бар'єру, що має криволінійну форму

В роботі [6] наведено результати експериментального дослідження по оцінюванню ефективності використання захисних бар'єрів різної форми, зокрема, захисного бар'єру, що має криволінійну форму. Результати наукових досліджень в цій роботи були спрямовані на визначення зниження концентрації домішки за місцем розташування джерела забруднення (рис. 5.1).



Рисунок 5.1 – Зона забруднення повітря біля криволінійного бар'єру.

У роботі [6] для формування джерела емісії використовувалися ароматизовані палички, які при згорянні утворюють дим. Цей дим можна було зафіксувати за допомогою фотокамери. Ароматизовані палички розміщувалися в нижній частині моделі автомобіля. Концентрацію *CO*, як продукту горіння, вимірювали за допомогою газоаналізатора GD-3301. Для створення повітряного потоку використовували повітродувку, а швидкість цього потоку визначали за допомогою анемометра GM 8908.

Модель авто мала розміри: довжина 46 см, ширина 8 см, середня висота моделі 11 см; висота джерела емісії *CO* 3 см; відстань від моделі до екрану 15 см; висота бар'єру 10 см. Температура повітря 22 °С. Середня концентрація *CO* біля джерела викиду 130 ppm. Швидкість потоку повітря V =138-157 см/с.

В якості критерія подібності використовувалося число Рейнольдса. Це число розраховувалося так:

$$\mathrm{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu},$$

де L – довжина моделі авто; V=1,7м/с – швидкість повітряного потоку; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості при температурі 22 °С.

При проведенні експерименту за допомогою повітродувки створювався потік повітря на модель авто та екран. Далі здійснювалася фотозйомка процесу формування зони забруднення та вимірювалася концентрація *CO*. Вимірювання концентрації *CO* здійснювалося протягом 1хв, на висоті 13см та довжині 4см, 8см, 12см від захисного бар'єру. На першому етапі було виконано вимірювання концентрації *CO* при відсутності захисного бар'єру, а далі – вимірювання концентрації *CO* за захисним бар'єром.

Дослідження проводилися для захисних бар'єрів різної форми [6]: «Г»-подібний бар'єр, що розташований «по потоку» (*сценарій №1*); «Г»-подібний бар'єр, що розташований «проти потоку» (*сценарій №2*); бар'єр з додатковим елементом типу «шафа» (*сценарій №3*); криволінійний бар'єр (*сценарій №4*).

Слід відзначити, що експериментальні дослідження для захисного бар'єру з додатковим елементом типу «шафа» (сценарій №3, [6]) розглядаються далі.

Результати експериментального дослідження показали, що бар’єр, який має криволінійну форму, дозволяє ефективно зменшити концентрацію забруднюючих речовин в повітрі за захисною спорудою. Так, на рис. 5.2 показано графічну залежність зміни концентрації *CO* для усіх сценаріїв. Відзначимо, що точці X=0 відповідає точка над захисним бар’єром [6] .

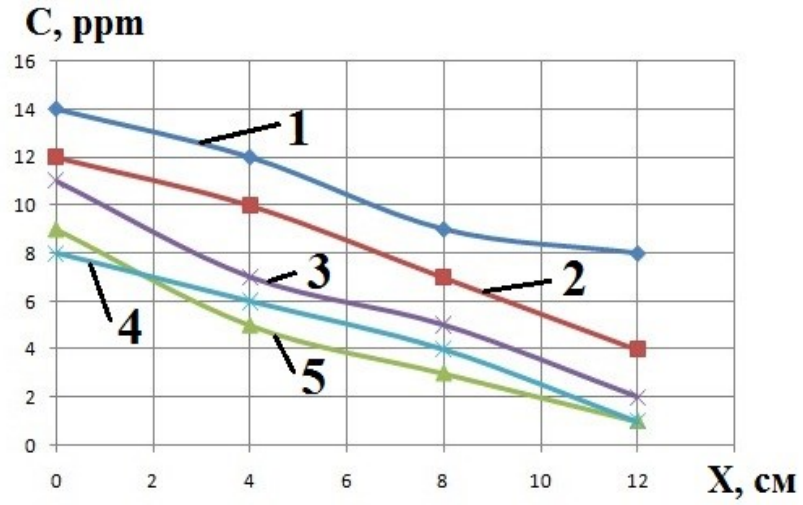


Рисунок 5.2 – Зміна концентрації *CO* за захисними бар’єрами:
1 –відсутній захисний бар’єр; 2 – сценарій №1; 3 – сценарій №3; 4 – сценарій №4; 5 – сценарій №2.

Як можна бачити з рис. 5.2, найбільш ефективним є використання екранів, що відповідають сценаріям 2 та 4 – це бар’єр з додатковим елементом типу «шафа» (сценарій №3) та криволінійний бар’єр (сценарій №4).

Приведені в [6] експериментальні дані, зокрема, відносяться до оцінки рівня забруднення повітря за захисним бар’єром криволінійної форми. Але головна проблема, пов’язана з аеродинамікою повітряного потоку за захисним бар’єром, не досліджувалося. Тому, в даному розділі наведено експериментальні дані стосовно цього важливого питання. Схема фізичної моделі бар’єру показана на рис. 5.3.

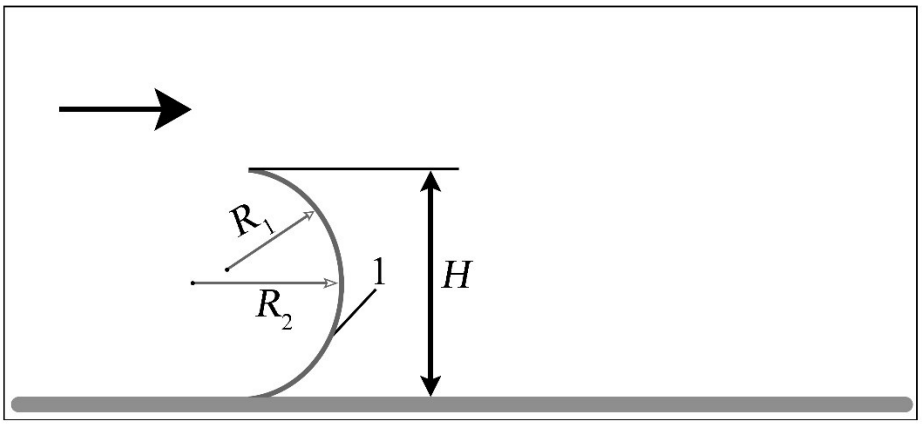


Рисунок 5.3 – Схема фізичної моделі криволінійного захисного бар’єру: 1 – захисний бар’єр (H=10 см, R_1 =5 см, R_2=6 см).

На першому етапі дослідження було проаналізовано вплив захисного бар'єру на аеродинаміку потоку за умови, коли «ввігнутість» спрямована проти напрямку потоку (рис. 5.4). Розміри захисного бар’єру: висота 10 см, ширина 10 см. Характерним розміром було обрано висоту бар’єру, яка становить H=10 см. Моделювання проводилось на основі критерію Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_0 H}{\nu}$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар’єром (визначалась шляхом вимірювання на висоті 0,5H та відстані H перед бар’єром); H – характерний розмір; ν – кінематичний коефіцієнт в’язкості (ν=15,06·10^{-6} м^2/с, t=20 °С).

Експеримент проводився при різній швидкості повітряного потоку в два етапи:

- Етап 1: вимірювання швидкості повітря безпосередньо за захисним бар’єром (на висоті 0,1H та відстані 0,5H від бар’єру);
- Етап 2: вимірювання швидкості повітря на різній відстані від захисного бар’єру (на висоті 0,1H).

Так як вимірювання проводилися при турбулентному режимі, то анемометр показував певний діапазон швидкості, тому тут (і далі) використовувалося середнє значення швидкості при обробці результатів вимірювань.



Рисунок 5.4 – Фото моделі захисного бар’єру, що має криволінійну форму (ввігнутість «проти потоку»).

На наступних рисунках представлено виміряну швидкість повітряного потоку за захисним бар'єром даної форми. Вимірювання швидкості здійснювалось на висоті 0,1H.

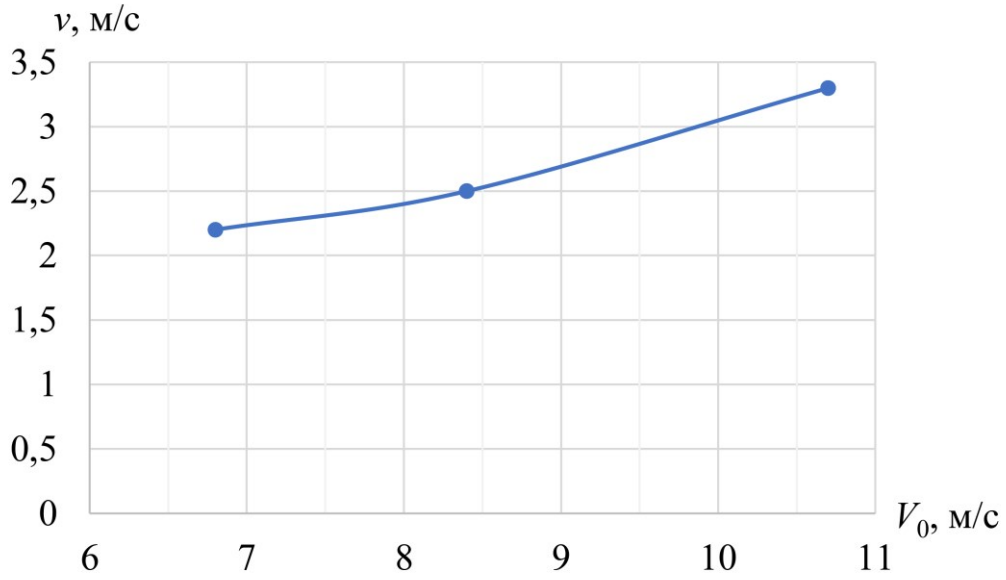


Рисунок 5.5 – Швидкість повітряного потоку за бар’єром (ввігнутість «проти потоку»).

Обробка експериментальних даних дозволяє отримати емпіричну модель, яка може бути застосована для визначення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром на висоті 0,1H і на відстані 0,5H від бар'єру:

$$v = 1{,}0603 \cdot e^{0{,}1051 \cdot V_0}, \qquad \text{м/с} \quad (5.1)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром.

На рис. 5.6 наведено зміну значень швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром уздовж моделі промислового майданчика. Вимірювання швидкості повітряного потоку проводилися на висоті 0,1H.

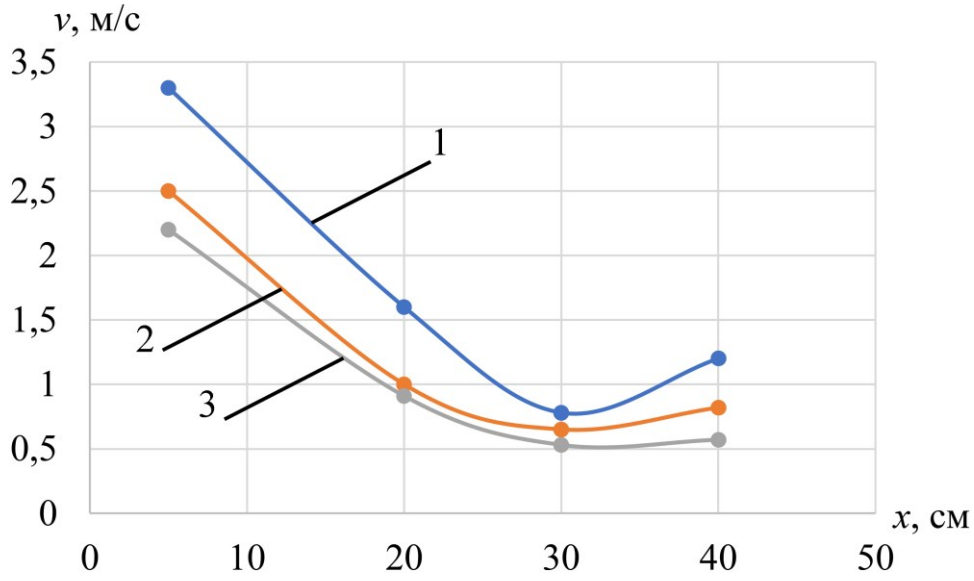


Рисунок 5.6 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (ввігнутість «проти потоку»): 1 – 10,7 м/с; 2 – 8,4 м/с; 3 – 6,8 м/с.

Результати, представлені на рис. 5.6, дозволяють встановити таку закономірність: за захисним бар'єром швидкість повітряного потоку знижується, досягаючи мінімального значення на відстані 3H від бар'єра. Після цього спостерігається збільшення локальної швидкості повітряного потоку.

На подальших рисунках показано результати експериментальних вимірювань значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром при

розташуванні ввігнутості «по потоку». Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалось на висоті 0,1*H*.

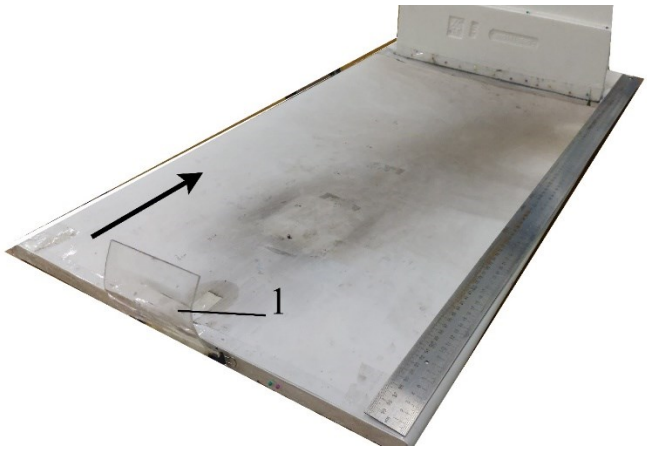


Рисунок 5.7 – Фото моделі захисного бар'єру, що має криволінійну форму (ввігнутість «по потоку»).

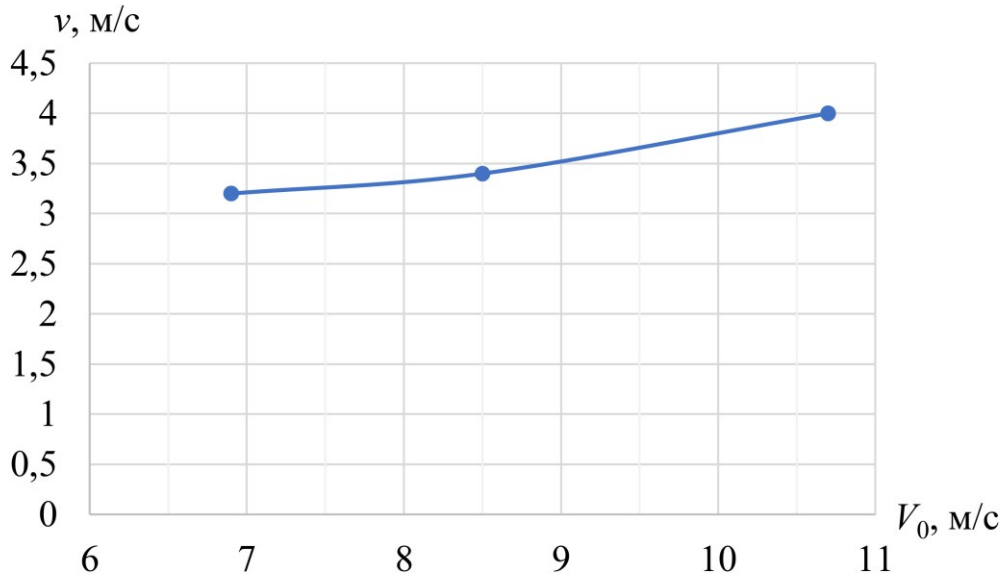


Рисунок 5.8 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (ввігнутість «по потоку»).

Обробка експериментальних даних дозволяє отримати емпіричну модель, яка може бути застосована для визначення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром на висоті 0,1H і на відстані 0,5H від бар'єру:

$$v = 2{,}0936 \cdot e^{0{,}0596 \cdot V_0} \qquad (5.2),$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром.

На рис. 5.9 наведено зміну значень швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром уздовж моделі промислового майданчика. Вимірювання швидкості повітряного потоку проводилися на висоті 0,1H.

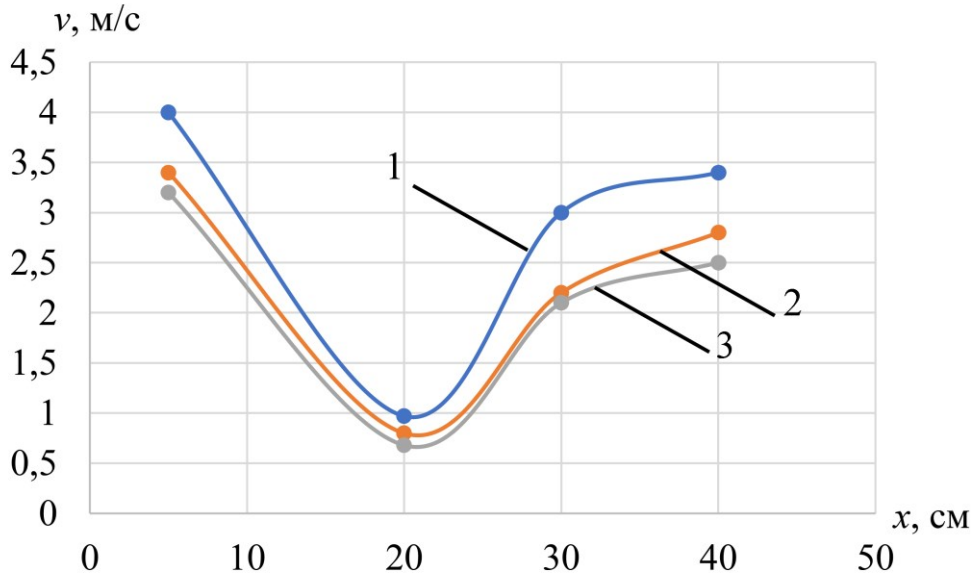


Рисунок 5.9 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (ввігнутість «по потоку»): 1 – 10,7 м/с; 2 – 8,5 м/с; 3 – 6,9 м/с.

Результати, представлені на рис. 5.9, дозволяють встановити таку закономірність: за захисним бар'єром швидкість повітряного потоку знижується, досягаючи мінімального значення на відстані 3H 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.

Побудова CFD моделі здійснювалася таким чином, щоб реалізувати наступну процедуру розрахунку:

1. Розрахувати поле швидкостей повітряного потоку на промисловому майданчику при наявності захисного бар'єру даної форми.

2. Розрахувати інтенсивність емісії пилу в залежності від локальної швидкості повітряного потоку над областю пилоутворення та при розташуванні захисного бар'єру даної форми.

3. Розрахувати поле концентрації пилу на промисловому майданчику, що формується внаслідок конвекції та дифузії при розташуванні захисного бар'єру даної форми.

Складність вирішення цих завдань полягає в тому, що необхідно проводити розрахунки в області зі складною геометрією.

Для розрахунку поля швидкостей на промисловому майданчику було використано модель потенційного руху (рівняння Лапласа):

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0,$$

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються на основі залежностей:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Граничні умови для рівняння Лапласа наступні :

1. $\frac{\partial P}{\partial x} = V_{in}$ – на границі входу (V_{in} – відома швидкість потоку повітря на цій границі).

2. P=P+Const – на границі виходу.

3. $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де n є зовнішньою нормаллю до твердої поверхні.

Для прогнозування рівня пилового забруднення було використано рівняння переносу пилових частинок:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i),$$

де C – концентрація пилу; u, v – компоненти вектору швидкості повітряного потоку; t – час; μ_x, μ_y – коефіцієнти дифузії.

Граничні умови для рівняння переносу наступні :

1. На вході в розрахункову область: $C=C_{(in)}$, де $C_{(in)}$ – відома концентрація пилу.

2. На виході повітря з розрахункової області: $C=C_{(out)}$, де $C_{(out)}$ – концентрація пилу в останній комірці; C – концентрація пилу в передостанній комірці.

3. На твердих поверхнях :

$$\frac{\partial C}{\partial n}=0,$$

де n – одинична нормаль до поверхні.

Початкові умови $t=0$ наступні*:* $C=C_0$, де C_0 – відома концентрація пилу на промисловому майданчику. Коефіцієнти дифузії (тут та в інших розділах) визначалися наступним чином:

$$\mu_x = k_0 \cdot u,\ \mu_y = k_0 \cdot v,\ k_0 = 0{,}1.$$

Для розв'язання задачі аеродинаміки рівняння для потенціалу швидкості було зведено до вигляду («нестаціонарне» рівняння):

$$\frac{\partial P}{\partial t}=\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

де t – фіктивний час.

Перед розв'язанням даного рівняння необхідно задати початкову умову для фіктивного часу, наприклад, $P=0$ для $t=0$.

Далі для розв'язання «нестаціонарного» рівняння було використана схема умовної апроксимації. На першому кроці розв'язувалося наступне рівняння :

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}-P_{i,j}^{n}}{\Delta t}=\left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right]+\left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}+P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу «рухомого рахунку», тобто за явною формулою.

На другому кроці розв'язувалося наступне рівняння:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

На кожному кроці невідоме значення концентрації домішки визначається за допомогою методу «рухомого рахунку», тобто за явною формулою.

Значення потенціалу швидкості на кожному кроці визначалося за явною формулою. Розрахунок закінчується, коли виконується наступна умова:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число. У розрахунках було прийнято ε =0,01; *n* – номер ітерації.

Далі були розраховані компоненти швидкості повітряного потоку за наступними формулами :

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для чисельного розв’язання рівняння переносу пилу на промисловому майданчику використовується:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i), \tag{5.4}$$

де *C* – концентрація пилу в повітрі; *w* – швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

Опис параметрів цього рівняння зроблено вище.

Для побудови різницевої схеми здійснювалося таке фізичне розщеплення рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i).$$

Третє рівняння системи вирішується за допомогою методу Ейлера.

Перше рівняння із цієї системи – це рівняння конвективного переносу, друге рівняння – рівняння дифузії.

При чисельному інтегруванні рівняння конвективного переносу використовуються такі залежності :

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^{+}C}{\partial x} + \frac{\partial u^{-}C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^{+}C}{\partial y} + \frac{\partial v^{-}C}{\partial y},$$

$$u^{+} = \frac{u + |u|}{2}, u^{-} = \frac{u - |u|}{2},$$

$$v^{+} = \frac{v + |v|}{2}, v^{-} = \frac{v - |v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}C}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j}C^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j}C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}C}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j}C^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{+}C}{\partial y} \approx \frac{v^{+}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j} - v^{+}_{i,j}C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{-}C}{\partial y} \approx \frac{v^{-}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j+1} - v^{-}_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y}C^{n+1}.$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу записується так :

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд :

$$\frac{C^{k}_{i,j} - C^{n}_{i,j}}{\Delta t} + L^{+}_{x}C^{k} + L^{+}_{y}C^{k} = 0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд :

$$\frac{C^{n+1}_{i,j} - C^{k}_{i,j}}{\Delta t} + L^{-}_{x}C^{n+1} + L^{-}_{y}C^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення C у кожному рівнянні визначається за формулою «рухомого рахунку».

Для чисельного інтегрування рівняння дифузії використовується двоетапна різницева схема розщеплення, яка має вигляд :

$$\frac{C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - C_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right],$$

$$\frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right].$$

Концентрація пилу в даних рівняннях визначалася за явною формулою.

На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерний код, мова програмування – FORTRAN.

Склад комп'ютерного коду:

– Q22T.DAT – файл даних для розрахунку 2D концентраційного поля на промисловому майданчику;

– Q22T1 – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q22T2 – розрахунок 2D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q22T3 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q22T4 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q22T5 – розрахунок 2D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Введення початкових даних (місце розташування бар'єру, геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т. д.).

2. Рішення 2D чисельної моделі аеродинаміки.

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів.

4. Рішення 2D чисельної моделі масопереносу.

5. Виведення «на друк» поля концентрації пилу на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні наступні дані:

1. Геометрична форма захисного бар'єру.

2. Розміри захисного бар'єру.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення.

4. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

7. Крок за часом.

8. Розміри 2D розрахункової сітки.

9. Розміри 2D розрахункової області

Особливості розробленої 2D CFD моделі:

1. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для будь-якої кількості захисних бар'єрів даної форми (криволінійні).

2. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для різноманітних розмірів «сходинок» та їх розташуванні біля бар'єру, тобто обмежень немає.

3. Можливість рішення 2D задачі масопереносу при будь-якій формі поверхні пилоутворення та при будь-якій її розташуванні відносно захисного бар'єру.

4. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення (наприклад, користувач задає математичну залежність інтенсивності пилоутворення при різній локальній швидкості повітряного потоку або задає інтенсивність такої емісії як «константу» при дефіциті даних стосовно цього параметру та при використанні літературних джерел).

5. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення в залежності від різної локальної швидкості повітряного потоку над поверхнею пилоутворення.

Нижче на рисунках показано результати комп'ютерного моделювання процесу переносу пилу на промисловому майданчику при розташуванні бар'єру даного типу. Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді: кожне число вказує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення. Таким чином, числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

Розрахунок здійснювався при наступних параметрах:

1. Розміри розрахункової області 25 м× 20 м.
2. Розмір розрахункової сітки 25 × 21 контрольний елемент.
3. Швидкість вітру 6 м/с.
4. Довжина області пилоутворення 3 м.
5. Інтенсівність пилоутворення 100 од. (в безрозмірному вигляді).
6. Ширина бар'єру 10 м.
7. Висота бар'єру 12.5 м
8. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 1,5 см/с .

Схема розрахункової області показана на рис. 5.10.

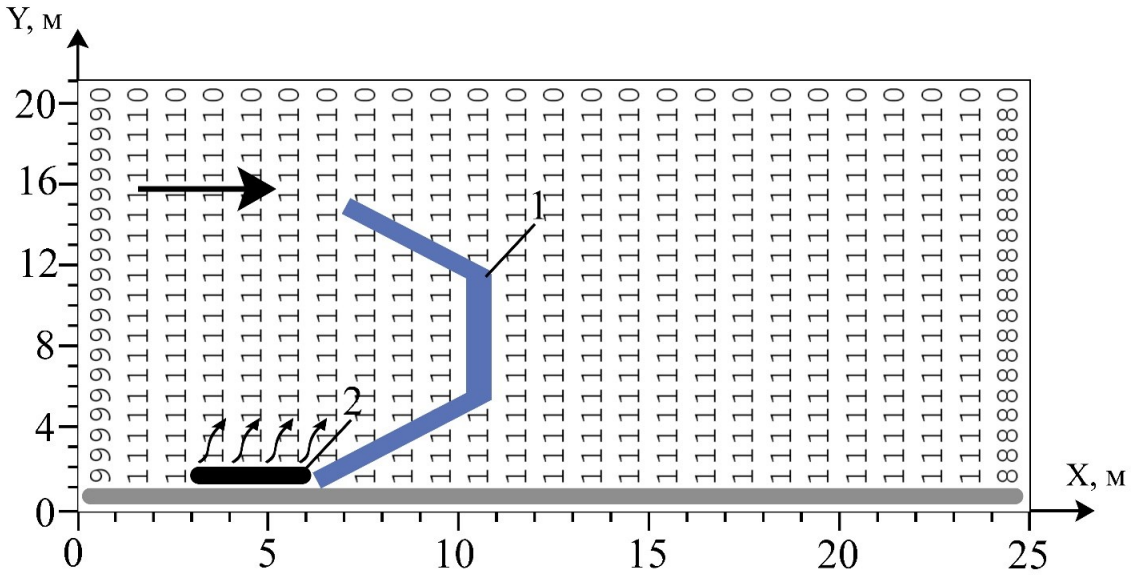


Рисунок 5.10 – Схема розрахункової області: 1 – криволінійний бар'єр, ввігнутість бар'єру «по потоку»; 2 – область пилоутворення.

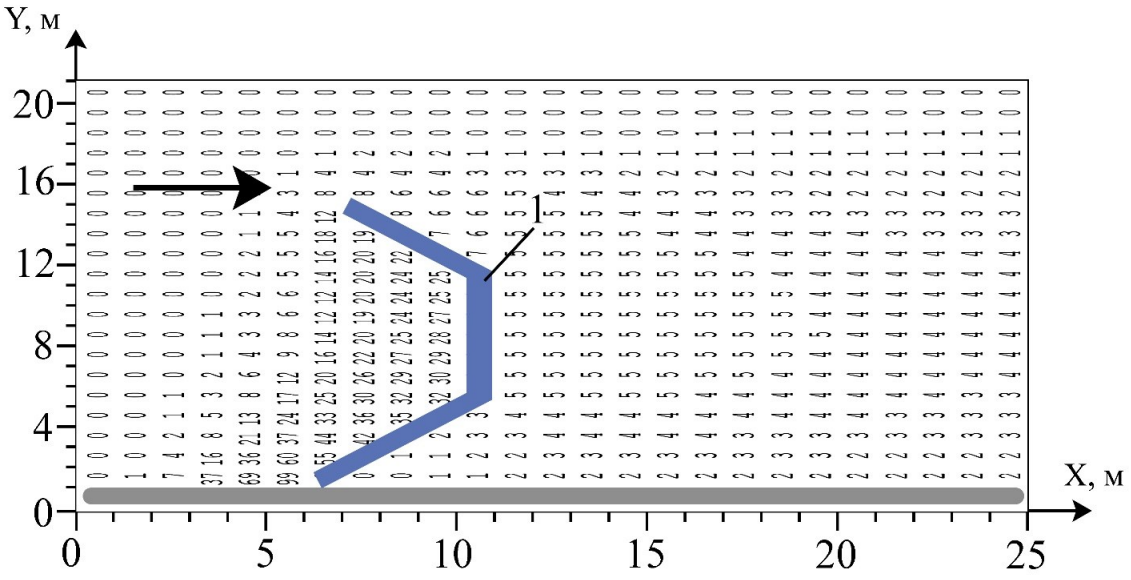


Рисунок 5.11 – Поле концентрації пилу на промисловому майданчику, ввігнутість бар’єру «по потоку».

Аналіз результатів комп’ютерного моделювання (рис. 5.11) 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 %.

Слід відзначити, що час розрахунку був 2 с. Таким чином, розроблена модель дає можливість в стислий час провести серію розрахунків по обґрунтуванню параметрів захисного бар’єру.

Для верифікації чисельної моделі було здійснено тестовий розрахунок задачі, що має аналітичне рішення. Умови задачі (Оладіпо Мутіо Олатойе): задана прямокутна область, де початкова температура дорівнює 400 °С. Розрахунок проводиться для області: 20м × 15м. На границях області для температури поставлена гранична умова: T_0=0 °С; a=1. Розрахунком визначається значення температури в точці: x=1 м, y=1 м для різних моментів часу.

Зміна температури в області описується рівнянням, що еквіваленте рівнянню Лапласа для потенціалу швидкості. Аналітичний розв’язок має вигляд (А. Д. Полянін):

$$T = T_0 \operatorname{erf}(\frac{x}{2\sqrt{at}}) \operatorname{erf}(\frac{y}{2\sqrt{at}})$$

У табл. 5.1 наведено дані розрахунку.

Таблиця 5.1 – Значення температури для різних моментів часу

Час *t*, с	Аналітичний розв’язок	Чисельна модель, Оладіпо М. О./ розроблена чисельна модель
2	54,76 ℃	55,11 ℃ / 56,22 ℃
4	29,16 ℃	29,23 ℃ / 30,14 ℃
6	19,71 ℃	20,12 ℃ / 21,07 ℃

Дані з табл. 5.1 підтверджують адекватність побудованої чисельної моделі.

5.2 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні бар’єру, що має додатковий елемент типу «шафа»

В роботі [6] наведено результати експериментального дослідження по оцінюванню ефективності захисного бар’єру на зниження концентрації домішки за джерелом забруднення, який має додатковий горизонтальний елемент типу «шафа» (рис. 5.12).

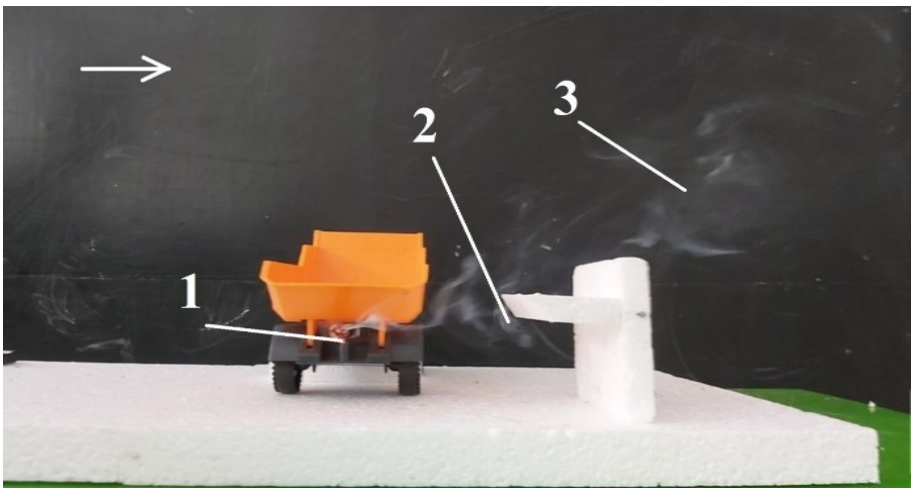


Рисунок 5.12 – Зона забруднення, бар’єр з додатковим елементом типу «шафа»: 1 – джерело емісії *CO*; 2 –додатковий елемент «шафа»; 3 – зона забруднення біля екрану (сценарій №3).

В лабораторії кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» УДУНТ було проведено комплекс експериментальних досліджень по визначенню аеродинаміки повітряних потоків на моделі промислового майданчика, де розташовано захисний бар’єр даної геометричної форми. На першому етапі дослідження здійснювався аналіз впливу захисного бар’єру на аеродинаміку потоку, коли елемент «шафа» розташовано «проти потоку» (рис. 5.13, рис. 5.14).

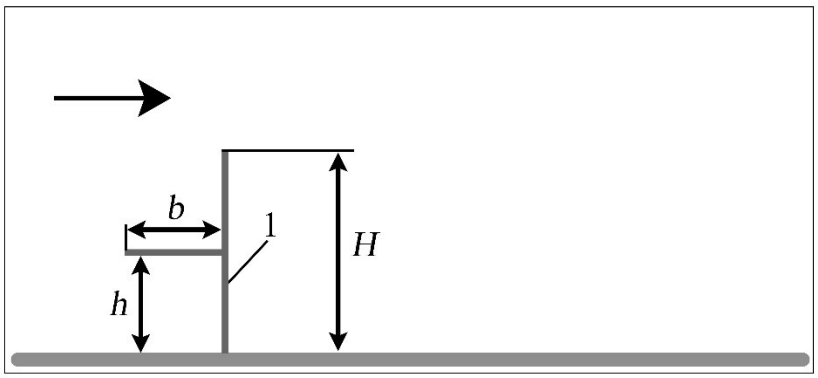


Рисунок 5.13 – Схема фізичної моделі захисного бар’єру: 1 – бар’єр (*H*=10 см, *h*=5 см, *b*=5 см).

Ширина моделі захисного бар'єру 10 см, довжина додаткового елементу «шафа» 5 см, висота розташування цього елементу 5 см. . В якості характерного розміру прийнята висота бар'єру H=10 см. Моделювання здійснювалось за критерієм Рейнольдса:

$$\mathrm{Re} = \frac{V_0 H}{\nu},$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром (визначалась шляхом вимірювання на висоті 0,5H та відстані H перед бар'єром); H – характерний розмір; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості (ν=15,06·10^{-6} м^2/с, t=20 °С).

Експеримент проводився для різної швидкості повітряного потоку в два етапи:

- Етап 1: визначення швидкості повітряного потоку безпосередньо за захисним бар'єром (на висоті 0,1H та відстані 0,5H від бар'єру).
- Етап 2: визначення швидкості повітряного потоку на різної відстані від захисного бар'єру (на висоті 0,1H).

На рис. 5.15 показано значення швидкості повітряного потоку за бар'єром, що має додатковий горизонтальний елемент «проти потоку». Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті 0,1H.



Рисунок 5.14 – Фото моделі захисного бар'єру (додатковий елемент розташовано «проти потоку»).

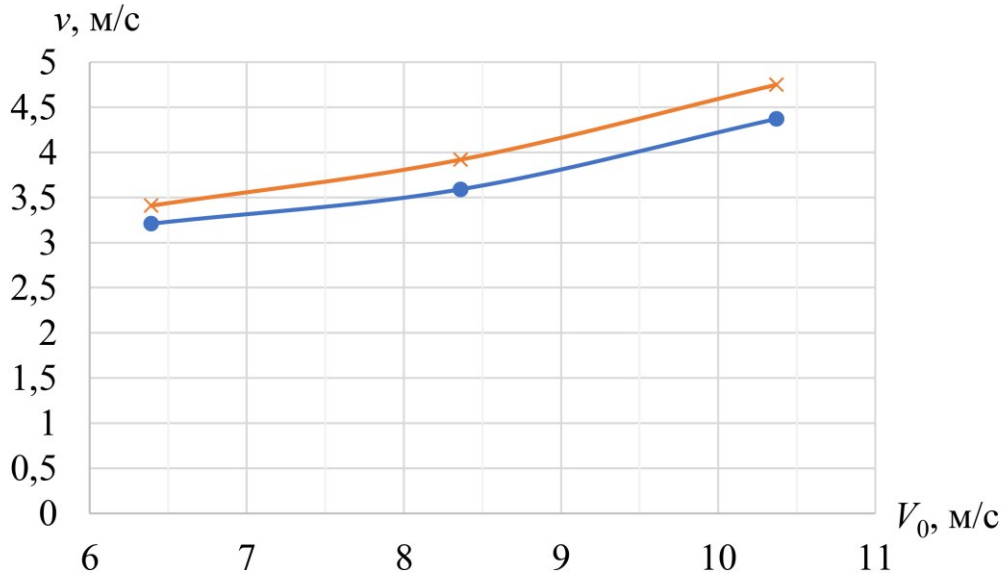


Рисунок 5.15 – Швидкість повітряного потоку за бар'єром (додатковий елемент розташовано «проти потоку»): × – розрахунок за розробленою моделлю.

Обробка експериментальних даних дозволяє отримати емпіричну модель, яка може бути застосована для визначення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром на висоті 0,1H і на відстані 0,5H від бар'єру:

$$v = 0,049V_0^2 - 0,5304 \cdot V_0 + 4,597, \qquad (5.3)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар'єром

На рис. 5.15 також показано значення швидкості за розрахунком на базі розробленої CFD моделі (явна схема), побудова якої розглядається нижче.

Далі на рис. 5.16 показано зміну значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром вздовж моделі промислового майданчику. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті $0,1H$.

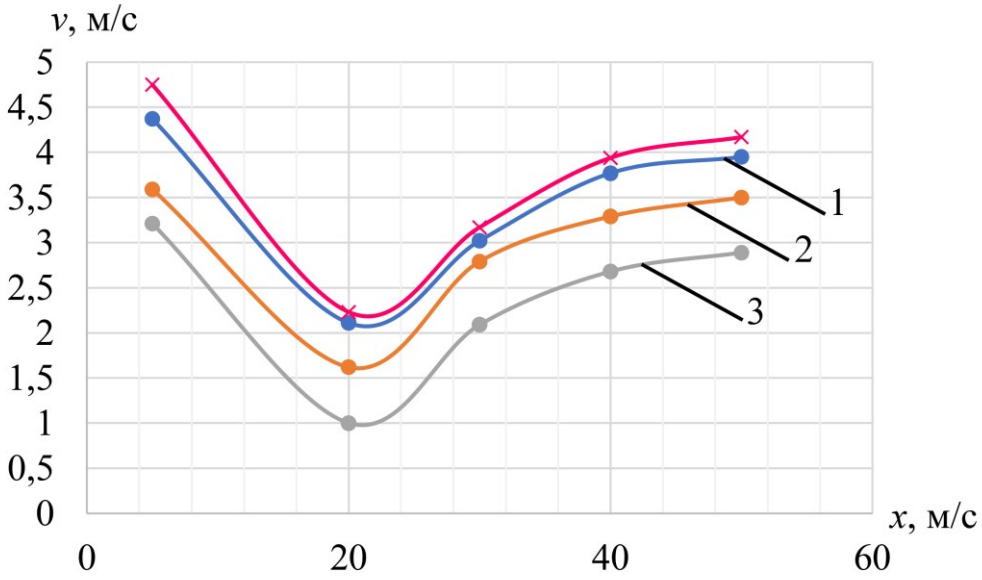


Рисунок 5.16 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (додатковий елемент розташовано «проти потоку»):
1 – 10,37 м/с; 2 – 8,36 м/с; 3 – 6,39 м/с;
× – розрахунок за розробленою моделлю (V_0=10,37 м/с).

Результати, що наведено на рис. 5.16, 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.

На рис. 5.16 також показано значення швидкості за розрахунком на базі розробленої CFD моделі (локально-одновимірна схема), побудова якої розглядається нижче.

На подальших рисунках показано результати експериментальних вимірювань значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром при розташуванні додаткового елементу «по потоку». Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті 0,1H.



Рисунок 5.17 – Фото моделі захисного бар’єру (додатковий елемент розташовано «по потоку»).

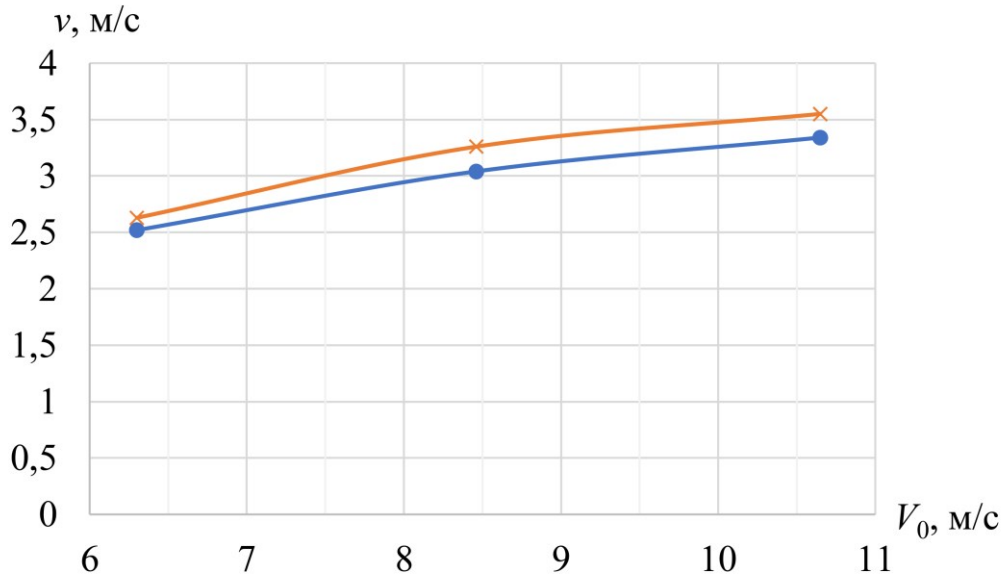


Рисунок 5.18 – Швидкість повітряного потоку за бар’єром (додатковий елемент розташовано «по потоку»): × – розрахунок за розробленою моделлю.

Обробка експериментальних даних дозволяє отримати емпіричну модель, яка може бути застосована для визначення швидкості повітряного потоку за захисним бар’єром на висоті 0,1H і на відстані 0,5H від бар’єру:

$$v = -0,0239V_0^2 + 0,5928 \cdot V_0 - 0,2679\,, \qquad (5.4)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар’єром.

На рис. 5.18 також показано значення швидкості за розрахунком на базі розробленої CFD моделі, побудова якої розглядається нижче.

Далі на рис. 5.19 показано зміну значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром вздовж моделі промислового майданчику. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалось на висоті 0,1*H*.

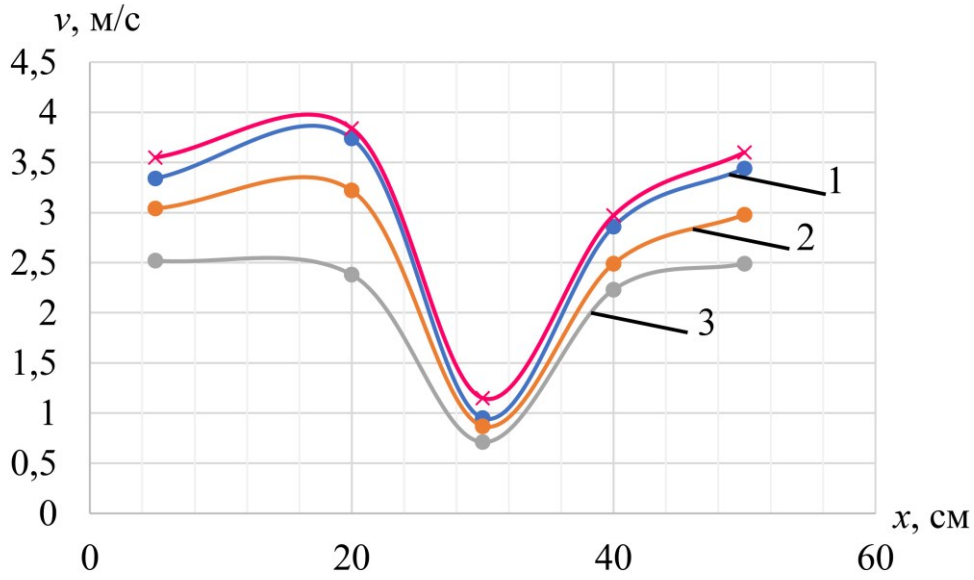


Рисунок 5.19 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром (додатковий елемент розташовано «по потоку»):
1 – 10,65 м/с; 2 – 8,46 м/с; 3 – 6,33 м/с; × – розрахунок за розробленою моделлю (V_0=10,65 м/с).

Результати, що наведено на рис. 5.19, дають можливість встановити таку закономірність: після захисного бар'єру швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані 3*H* від захисного бар'єру, а далі починається інтенсивне зростання локальної швидкості повітряного потоку до точки, що розташована на відстані 4*H* від захисного бар'єру.

На наступному етапі було побудовано CFD модель для оцінювання рівня пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного бар'єру даної форми.

Для рішення задачі аеродинаміки використовувалася модель потенціального руху. Як відомо, моделююче рівняння в цьому випадку має вигляд:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0, \tag{5.5}$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для даного рівняння розглянуто раніше.

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа попередньо його записано в еволюційному вигляді:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{5.6}$$

де t – фіктивний час. При $t \to \infty$ розв'язок (5.6) буде прагнути до «сталого» розв'язку, тобто до розв'язку (5.5).

Для розв'язання даного рівняння застосовується така різницева схема (явна схема) :

$$P_{ij}^{n+1} = P_{ij}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{ij}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - 2P_{ij}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

За допомогою цієї явної залежності визначається поле потенціалу швидкості в усіх внутрішніх осередках розрахункової області.

Також була розроблена інша чисельна модель для рішення рівняння аеродинаміки. Ця модель базується на розщеплені «нестаціонарного» рівняння аеродинаміки наступним чином (геометричне розщеплення):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}, \tag{5.7}$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}. \tag{5.8}$$

Далі для визначення невідомого значення P на базі рівняння (5.7) використовується така залежність (локально- одновимірна схема) :

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Для визначення невідомого значення *P* на базі рівняння (5.8) застосовується залежність :

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Обчислення закінчуються при виконанні наступної умови:

$$\left| P_{ij}^{n+1} - P_{ij}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число (ε=0,001), *n* – номер ітерації.

За відомими значеннями потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектору швидкості:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для верифікації обох побудованих чисельних моделей використовувалась задача, яка має аналітичне рішення та наведена в попередньому підрозділі. У табл. 5.2 наведені дані розрахунку.

Таблиця 5.2 – Значення температури для різних моментів часу

Час, с	Аналітичний розв'язок	Чисельний розв'язок (Оладіпо М.О.)	Розроблена чисельна модель (явна різницева схема)	Розроблена чисельна модель (схема розщеплення)
2	54.76 ℃	55,11 ℃	56,14 ℃	56,24 ℃
4	29,16 ℃	29,23 ℃	29,98 ℃	29,87 ℃
6	19,71 ℃	20,12 ℃	20,32 ℃	20,21 ℃

Дані з табл. 5.2 підтверджують адекватність побудованих чисельних моделей.

Далі було здійснено порівняння чисельних даних з експериментальними даними (значення швидкості повітряного потоку на відстані 5 см від бар'єру та на висоті 1 см, додатковий елемент розташовано «проти потоку»). Результати верифікації показано в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 Значення швидкості повітряного потоку за бар'єром

V_0 (швидкість набігаючого потоку), м/с	v (швидкість потоку за бар'єром), м/с: Експеримент / розрахунок (явна схема; схема розщеплення)
6.5	3.3/(3.46; 3.42)
8.4	3.5 / (3.71; 3.68)
10.4	4.3 / (4.52; 4.47)

Дані з табл.5.3 підтверджують адекватність побудованих чисельних моделей.

Для моделювання процесу поширення домішки від джерела забруднення (емісія з поверхні пилоутворення) використовується наступне рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial (v-w)C}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+ \\ +Q_i(t)\cdot\delta(x-x_i)\cdot\delta(y-y_i), \tag{5.9}$$

де C – концентрація пилу в повітрі, u, v – складові вектора швидкості вітру, x_i, y_i – декартові координати джерела емісії пилу, t – час, μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x_i–x)\delta(y_i–y)$ – дельта-функція Дірака, Q – інтенсивність емісії пилу, w – швидкість гравітаційного осадження пилу.

Коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері визначаються наступним чином:

$$\mu_x=0{,}1\cdot u,\ \ \mu_y=0{,}1\cdot v.$$

В різницевій форми рівняння масопереносу пилу розщеплюється наступним чином (змінно-трикутна схема розщеплення, приймається $v=v–w$):

– на *першому кроці* розщеплення $k=n+\frac{1}{4}$ різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{+}C^{k}+L_{y}^{+}C^{k}\right)= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{+}C^{k}+M_{xx}^{-}C^{n}+M_{yy}^{+}C^{k}+M_{yy}^{-}C^{n})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \tag{5.10}$$

– на *другому кроці* розщеплення $k=n+\frac{1}{2}$, $c=n+\frac{1}{4}$ різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{-}C^{k}+L_{y}^{-}C^{k}\right)= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{k}+M_{xx}^{+}C^{c}+M_{yy}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \tag{5.11}$$

– на *третьому кроці* розщеплення $k=n+\frac{3}{4}$, $c=n+\frac{1}{2}$ різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{+}C^{k}+L_{y}^{-}C^{k}\right)= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{c}+M_{xx}^{+}C^{k}+M_{yy}^{-}C^{k}+M_{yy}^{+}C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \tag{5.12}$$

– на *четвертому кроці* розщеплення $k=n+1$, $c=n+\frac{3}{4}$ різницеве рівняння має вигляд:

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{-}C^{k}+L_{y}^{+}C^{k}\right)= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}C^{k}+M_{xx}^{+}C^{c}+M_{yy}^{-}C^{c}+M_{yy}^{+}C^{k})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_{l}}{4}\delta_{l}; \tag{5.13}$$

Значення різницевих операторів $L_{x}^{+},L_{x}^{-},L_{y}^{+}...$ наведено раніше.

З рівнянь (5.10)-(5.13) невідоме значення концентрації пилу на верхньому часовому шарі визначається за явною формулою рухомого рахунку. Початкова умова для цих рівнянь записується у вигляді :

$$C^{1}\Big|=C\left(x,y,t^{n}\right),C^{k}\Big|=C^{k-1}\Big|.$$

Щоб реалізувати граничну умову на твердих стінках вигляду:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$$

застосовуються фіктивні комірки.

Для оцінки ефективності бар'єру використовувався наступний параметр :

$$HQ = \frac{C_R}{R_{fc}},$$

де HQ – показник ризику потенційної небезпеки (Hazard Quotient); C_R – концентрація домішки в точці розташування рецептора; R_{fC} – референтна концентрація (наприклад, для CO: R_{fC}=3 мг/м^3). Якщо HQ<<1, це означає, що ризик для здоров'я мінімальний.

На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерний код, мова програмування – FORTRAN.

Склад комп'ютерного коду:

– Q77T.DAT – файл даних для розрахунку 2D концентраційного поля на промисловому майданчику;

– Q77T*1* – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE», явна різницева схема);

– Q77E*1* – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE», локально-одновимірна різницева схема);

– Q77T*2* – розрахунок 2D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q77T3 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q77T4 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q77T5 – розрахунок 2D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Формування блоку початкових даних (місце розташування бар'єру, геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т. д.).

2. Рішення 2D чисельної моделі аеродинаміки (користувач має вибір – здійснити розрахунок на базі явної різницевої схеми або на базі локально-одновимірної схеми).

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів.

4. Рішення 2D чисельної моделі масопереносу (визначення концентраційних полів домішки на промисловому майданчику).

5. Виведення «на друк» поля концентрації пилу на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні такі дані:

1) геометрична форма захисного бар'єру;

2) розміри захисного бар'єру;

3) місце розташування поверхні пилоутворення;

4) інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки);

5) швидкість набігаючого повітряного потоку;

6) швидкість гравітаційного осадження часток пилу;

7) крок за часом;

8) розміри 2D розрахункової сітки;

9) розміри 2D розрахункової області.

Особливості розробленої 2D CFD моделі:

1. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для довільної кількості захисних бар'єрів даної форми (криволінійні бар'єри).

2. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для різноманітних розмірів «сходинок» та їх розташуванні біля бар'єру, тобто обмежень немає.

3. Можливість рішення 2D задачі масопереносу при будь-якій поверхні пилоутворення та при будь-якому її розташуванні відносно захисного бар'єру.

4. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення (наприклад, користувач задає математичну залежність інтенсивності пилоутворення при різній локальній швидкості повітряного потоку або задає інтенсивність такої емісії як «константу» при дефіциті даних відносно цього параметру та використанні літературних джерел).

5. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення в залежності від різної локальної швидкості повітряного потоку над поверхнею пилоутворення.

Нижче наведено результати рішення двох модельних задач (двовимірна чисельна модель). Перша задача – визначення ефективності використання захисних бар'єрів різної форми по зниженню концентрації домішки за бар'єром. На рис. 5.20, 5.21 показано область дослідження для двох розрахункових схем. В першому варіанті – обидва бар'єра є вертикальними, в другому варіанті – один з бар'єрів має додатковий елемент, як показано на рис. 5.21.

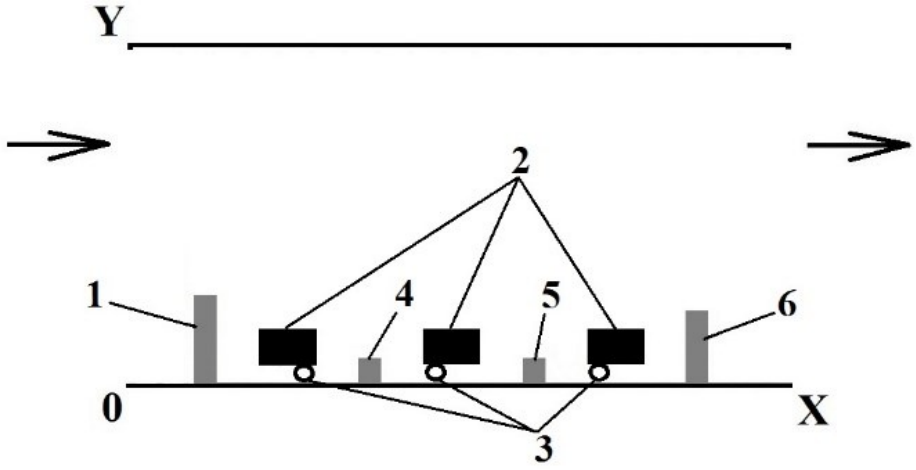


Рисунок 5.20 – Розрахункова схема №1:
1 – вертикальний бар'єр; 2 – джерело емісії 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – перешкоди; 6 – вертикальний бар'єр.

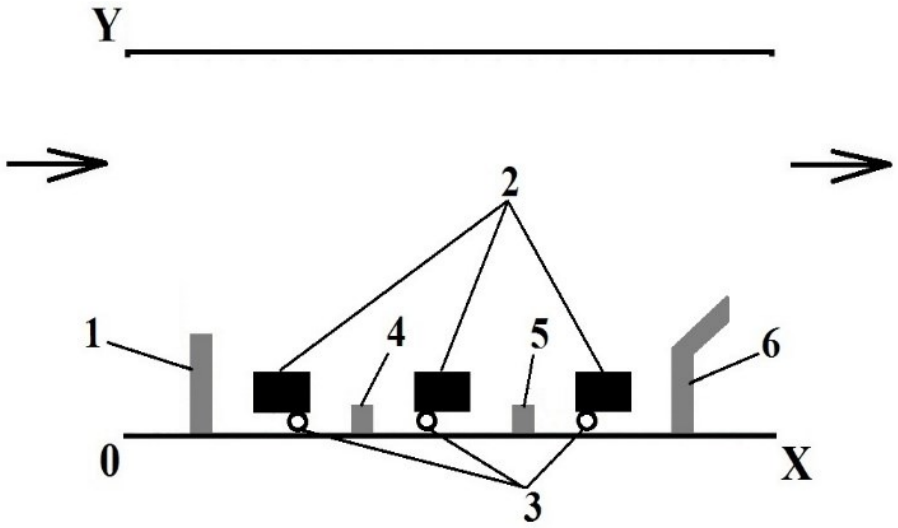


Рисунок 5.21 – Розрахункова схема №2:
1 – вертикальний бар'єр; 2 –джерело емісії; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – перешкоди; 6 – вертикальний бар'єр з додатковим елементом.

При розрахунку приймалося: швидкість повітряного потоку 7 м/с; розміри розрахункової області 50 м × 13 м; інтенсивність емісії 100 од. (безрозмірна).

На рис. 5.22, 5.23 показано область забруднення для кожної розрахункової схеми. Значення концентрації наведено в безрозмірному вигляді, кожне число на цих рисунках відповідає у відсотках концентрації від її максимального значення в розрахунковій області. Максимальному значенню концентрації відповідає число «99». Друк концентрації здійснено у форматі «INTEGER».

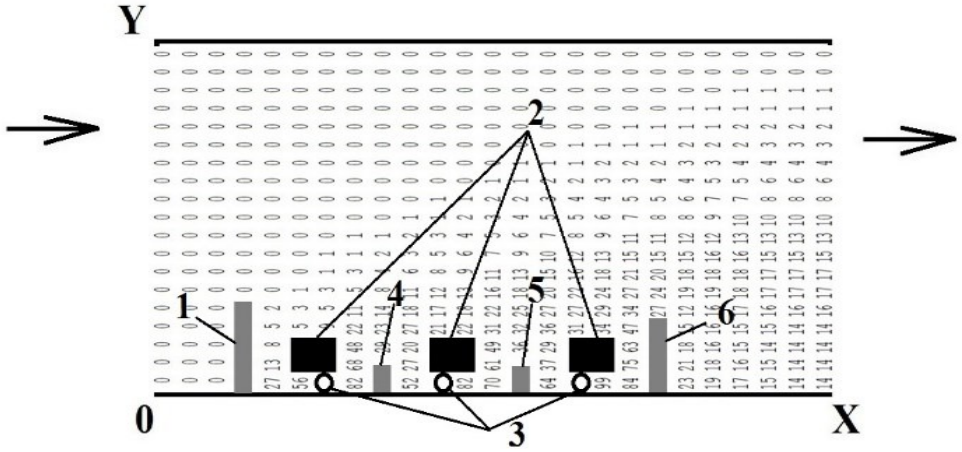


Рисунок 5.22 – Концентрація домішки (безрозмірна) для розрахункової схеми №1: 1 – вертикальний бар'єр; 2 –джерело емісії; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – перешкоди; 6 – вертикальний бар'єр.

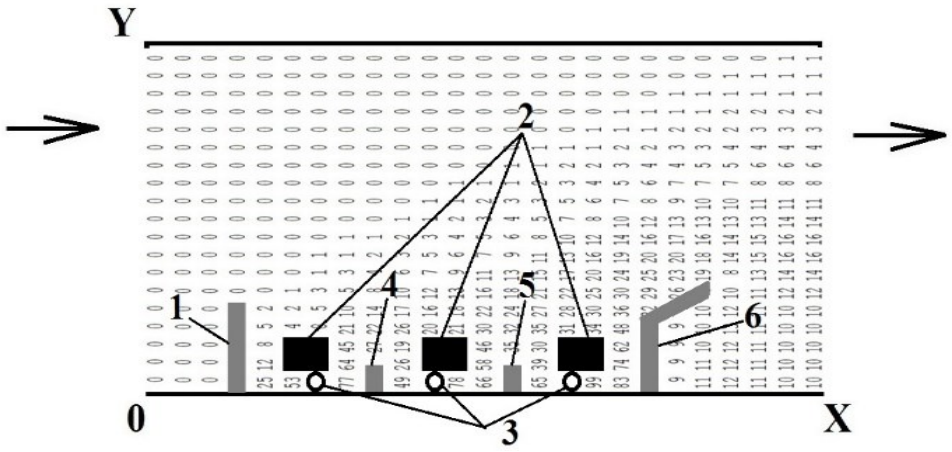


Рисунок 5.23 – Концентрація домішки (безрозмірна) для розрахункової схеми №2: 1 – вертикальний бар'єр; 2 – джерело емісії; 3 – місце викиду домішки; 4, 5 – перешкоди; 6 – вертикальний бар'єр з додатковим елементом.

Якщо проаналізувати значення концентрації для кожної розрахункової схеми для зони, що розташована за другим бар'єром (позиція 6, рис. 5.22, 5.23), то можна бачити, що для другої розрахункової схеми (вертикальний бар'єр з додатковим елементом) концентрація домішки суттєво менше в цій зоні, ніж для першої розрахункової схеми (просто вертикальний бар'єр). На рис. 6 показано значення концентрації в цій зоні на висоті 1,7м.

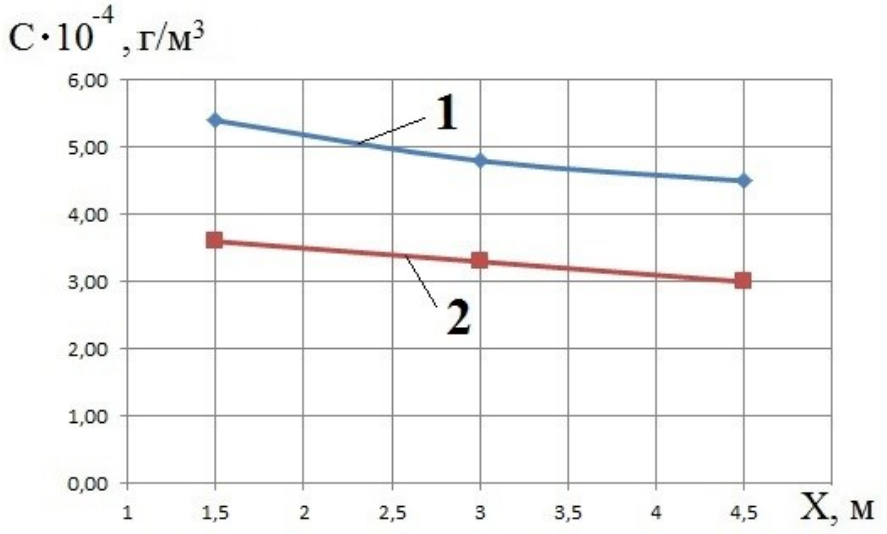


Рисунок 5.24 – Значення концентрації домішки за бар'єром: 1 – розрахункова схема №1; 2 – розрахункова схема №2.

Як можна бачити з рис. 5.24, використання вертикального бар'єру з додатковим елементом більш ефективно ніж використання тільки вертикального бар'єру без додаткового елемента.

Друга модельна задача – розрахунок зон забруднення при викидах домішки з дороги із захисним бар'єром, що мав складну форму. Було розглянуто чотири сценарії: сценарій № 1 – відсутність захисного бар'єру (рис. 5.25); сценарій № 2 – вертикальний Г-подібний бар'єр, H=2,5м, довжина горизонтального елемента 1м (рис. 5.26); сценарій №3 – Г-подібний бар'єр, H=5м, довжина горизонтального елемента 1м (рис. 5.27); сценарій № 4 – бар'єр з додатковим елементом, що має складну форму (рис. 5.28).

Вихідні дані були такими:

1) швидкість повітряного потоку u_1=5,3м/с;

2) висота павільйону 5м;

3) бар'єр знаходився в 7м від павільйону;

4) розміри розрахункової області 25м × 12,5м;

5) інтенсивність викиду *домішки* склала 17мг/с.

Точка «інтересу» (рецептор) знаходилася біля стіни павільйону на висоті 1,7м (рис.5.25). Результати чисельного експерименту (зони забруднення) показано на рисунках нижче. Кожне число на цих рисунках показує концентрацію забруднювача у відсотках від максимальної концентрації C_{max}.

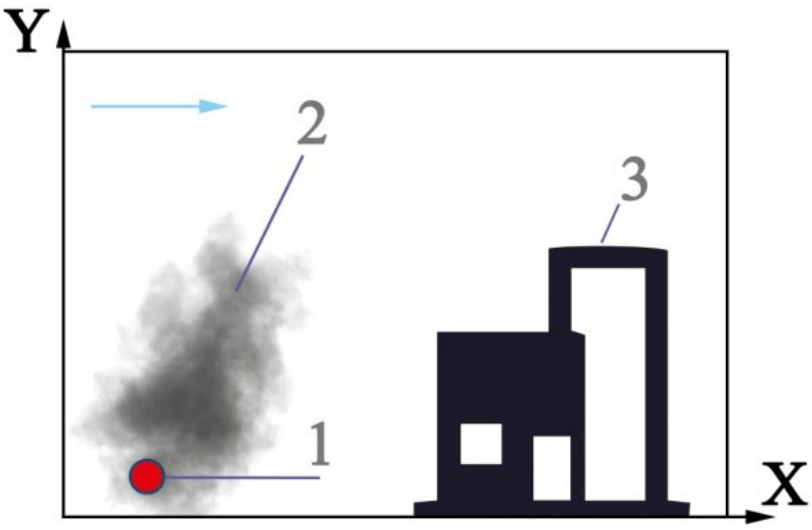


Рисунок 5.25 – Схема розрахункової області (сценарій №1, бар'єр відсутній).

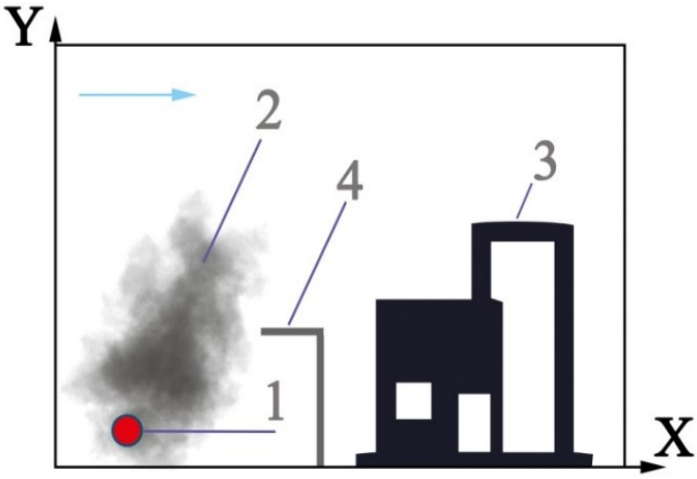


Рисунок 5.26 – Схема розрахункової області (сценарій №2, висота бар'єру H=2.5 м).

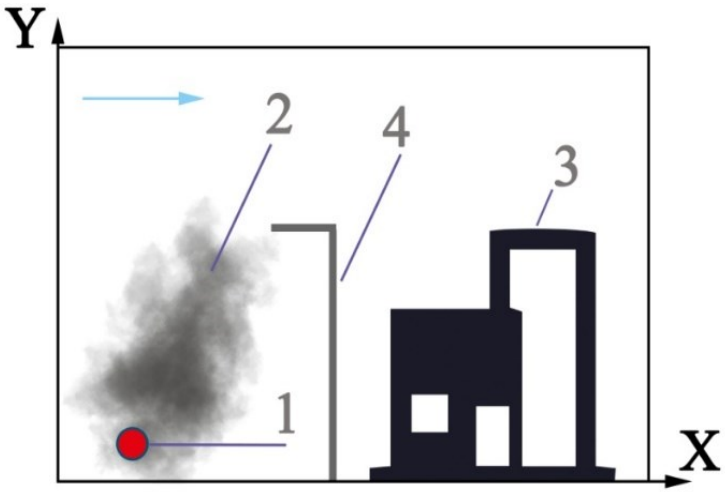


Рисунок 5.27 – Схема розрахункової області (сценарій №3, висота бар'єру H=5 м).

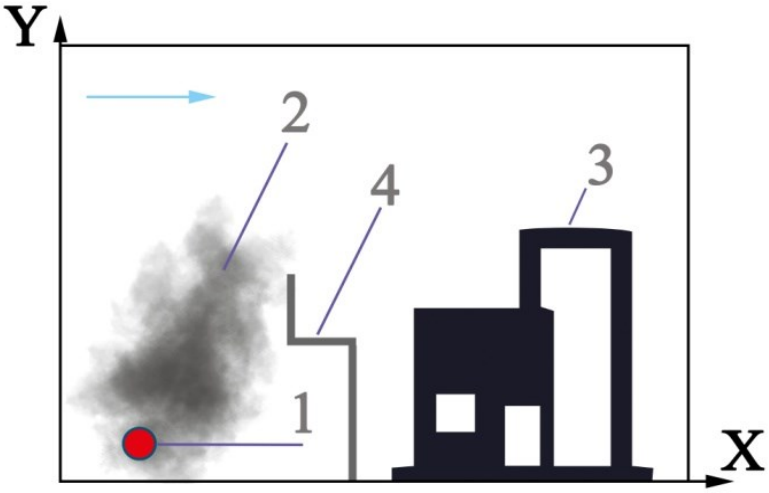


Рисунок 5.28 – Схема розрахункової області (сценарій №4, бар'єр з додатковим елементом).

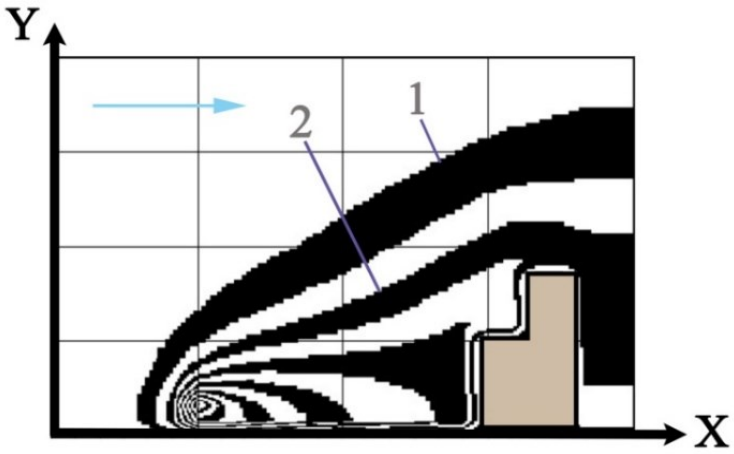


Рисунок 5.29 – Ізолінії концентрації домішки (сценарій №1): 1 – C=0.24 мг/м^3; 2 – C=0.56 мг/м^3.

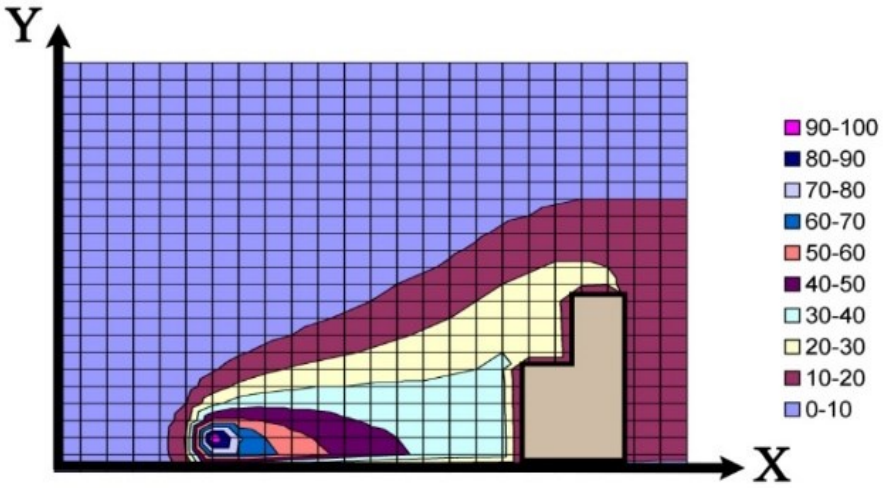


Рисунок 5.30 – Поле концентрації домішки, сценарій № 2, C_{max}=2.41 мг/м^3.

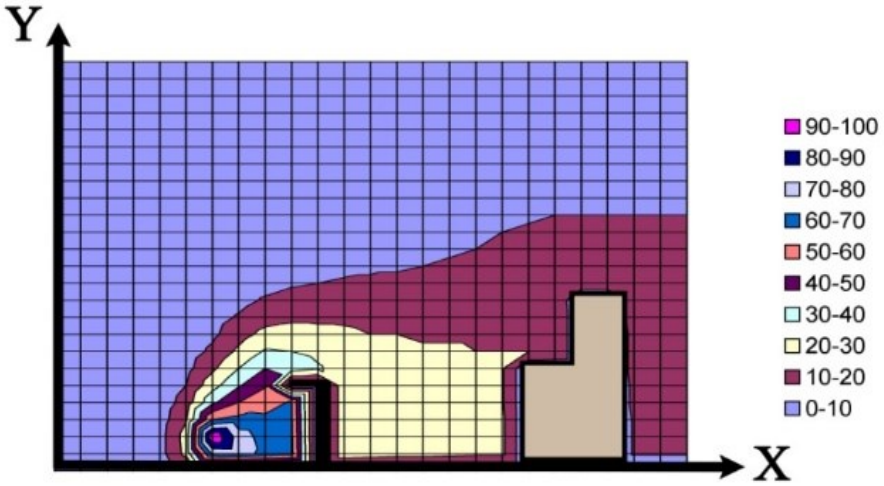


Рисунок 5.31 – Поле концентрації домішки, сценарій № 3, C_{max}=2.88 мг/м^3.

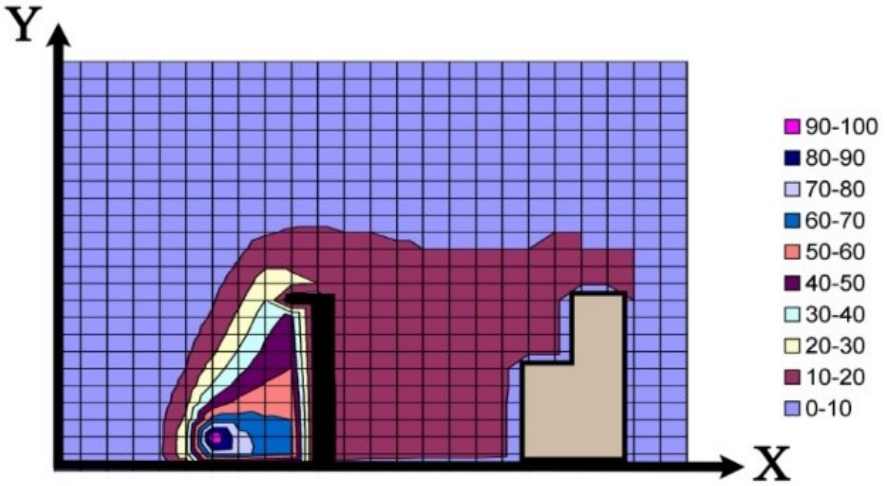


Рисунок 5.32 – Поле концентрації домішки, сценарій № 3, C_{max}=3.29 мг/м^3.

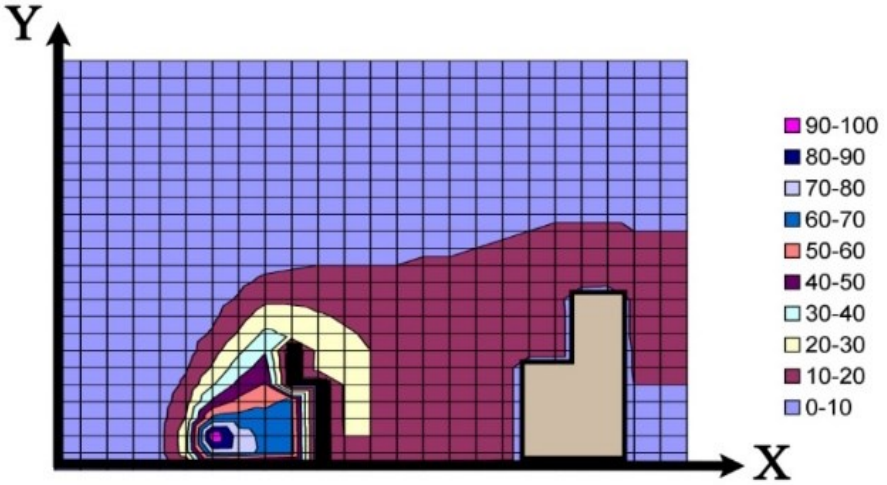


Рисунок 5.33 – Поле концентрації домішки, сценарій № 4, C_{max}=3.12 мг/м^3.

Дані комп’ютерного моделювання, наведені на рисунках, показують, що бар'єри викликають деформацію зони забруднення. Найбільш забруднена зона утворилася між джерелом викидів та бар’єром через «гальмування» вітрового потоку в цій області.

У табл. 5.4 наведено показник ризику потенційної небезпеки для рецептора (людина біля павільйона, референтна концентрація для *CO*).

Таблиця 5.4 – Показник ризику потенційної небезпеки HQ (Hazard Quotient)

Сценарій	***HQ***
Сценарій №1	0,27
Сценарій №1	0,21
Сценарій №1	0,14
Сценарій №1	0,18

Дані табл. 5.4 показують, що найбільш ефективним є 3-й сценарій, тобто використання бар'єру, що має висоту *H*=5м.

Також видно, що якщо використовувати бар'єр висотою *H*=2,5м, але з додатковим елементом (сценарій № 4), то це дозволяє досягти також непоганого результату.

Варто відзначити, що час обчислення становив 2 секунди для кожного сценарію.

Далі наведено результати комп'ютерного експерименту по аналізу концентраційного поля пилу на промисловому майданчику при наявності захисного бар'єру з додатковим елементом типу «шафа».

Нижче на рисунках показано результати комп'ютерного моделювання процесу переносу пилу на промисловому майданчику при розташуванні бар'єру з додатковим елементом типу «шафа». Розрахунок здійснювався при таких параметрах:

1. Розміри розрахункової області 25 м × 10,5 м.
2. Розмір розрахункової сітки 25 × 21 контрольний елемент.
3. Швидкість вітру 5 м/с.
4. Довжина області пилоутворення 6 м.
5. Інтенсивність пилоутворення 100 од (в безрозмірному вигляді).
6. Ширина бар'єру 1 м.
7. Висота бар'єру 5 м
8. Довжина горизонтального елемента 2 м.
9. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 1,5 см/с.

Схема розрахункової області показана на рис. 5.34. Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення. Таким чином, числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

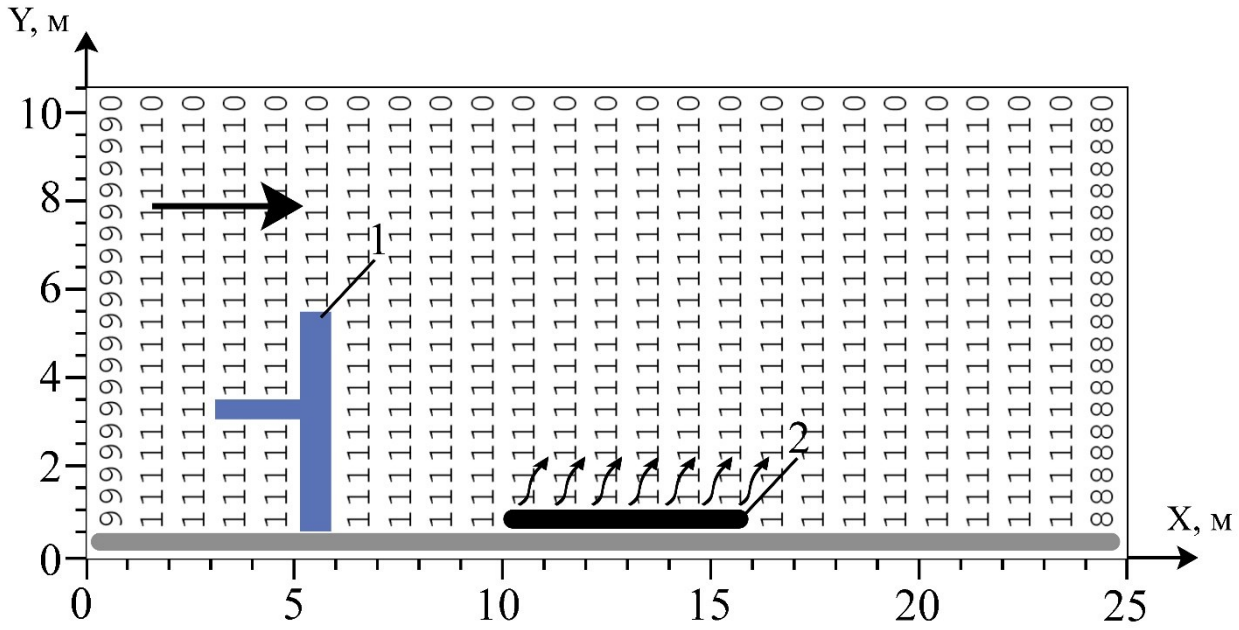


Рисунок 5.34 – Схема розрахункової області: 1 – бар’єр з горизонтальним елементом; 2 – область пилоутворення.

Нижче на рисунку показано поле концентрації пилу в області дослідження. Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення; числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

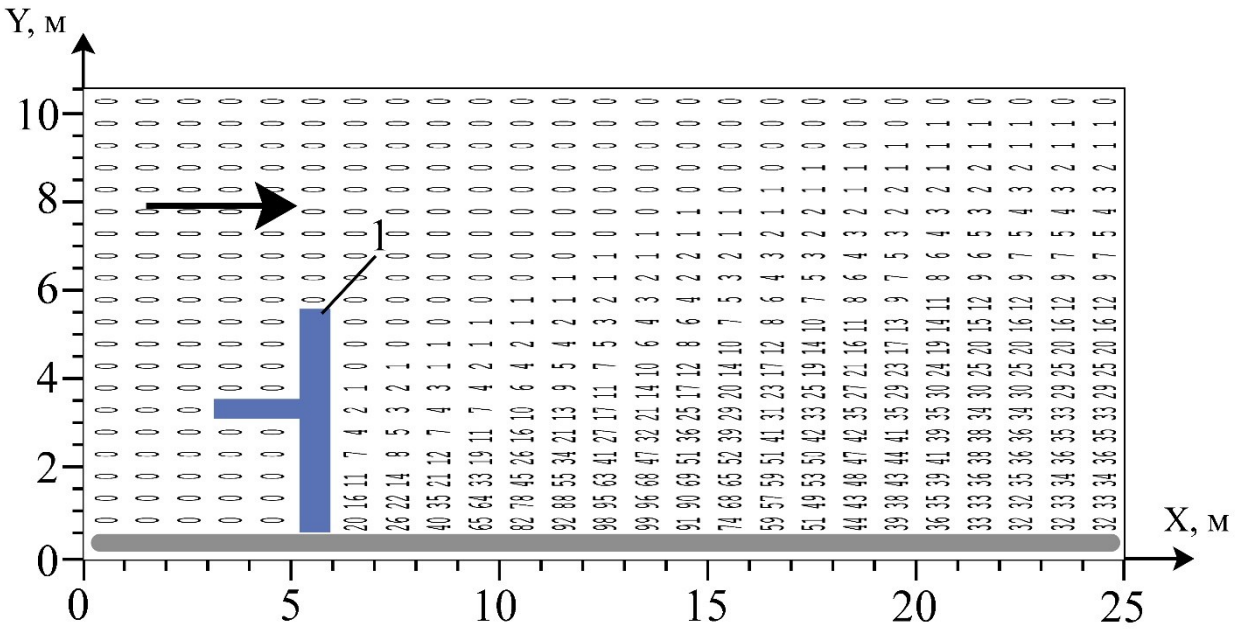


Рисунок 5.35 – Поле концентрації пилу на промисловому майданчику: 1 – захисний бар’єр.

Аналіз даних, що наведено на рис. 5.35, показує, що при використанні захисного бар’єру даного 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. 5.5 показано значення *HQ* для швидкості вітру 8 м/с, інтенсивність пилоутворення розраховувалася на базі емпіричної моделі, що побудована в

Розділі 4. В якості референтної концентрації для пилу використовувалось значення 5 мг/м^3.

Таблиця 5.5 – Значення показника ризику потенційної небезпеки HQ

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

Аналізуючи дані з табл. 5.5 можна зробити висновок – використання захисного бар'єру даної форми дає можливість значно зменшити ризик появи захворювання у працівників.

На наступному етапі була розроблена 3D CFD модель для прогнозування концентрації пилу на промисловому майданчику при використанні захисного бар'єру даної форми (з додатковим елементом типу «шафа»). Для рішення задачі аеродинаміки використовувалося тривимірне рівняння для потенціалу швидкості

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial z^2}=0,$$

де P – потенціал швидкості, на базі якого розраховується поле швидкості повітряного потоку:

$$u=\frac{\partial P}{\partial x},\ v=\frac{\partial P}{\partial y},\ w=\frac{\partial P}{\partial z}.$$

Граничні умови для рівняння аеродинаміки розглянуті раніше.

Для чисельного інтегрування використовуються контрольні елементи (розрахункова сітка) у вигляді паралелепіпедів. Значення потенціалу швидкості визначаються в центрах контрольних елементів, компоненти вектора швидкості повітряного потоку визначаються на бічних сторонах контрольних елементів.

Рівняння для потенціалу швидкості приводилося до «нестаціонарного» вигляду, після чого використовувалася схема розщеплення (метод А. Самарського), що наведена далі:

- перший крок розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{0,5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} +$$
$$+ \frac{P_{i,j,k+1}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2};$$

- другий крок розщеплення:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{0,5\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} +$$
$$+ \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} + \frac{-P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2}.$$

На кожному кроці розщеплення потенціал швидкості розраховується за явною формулою.

Обчислення завершується, коли виконується наступна умова:

$$\left| P_{ijk}^{n+1} - P_{ijk}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число (ε=0,001), *n* – номер ітерації.

Після розрахунку 3D поля потенціалу швидкості визначаються компоненти вектора швидкості повітряного потоку на бічних гранях контрольних елементів

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}, v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y}, w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

Після розрахунку 3D поля швидкості повітряного потоку здійснюється чисельне інтегрування рівняння переносу пилу на промисловому майданчику. Значення концентрації пилу визначаетсяв центрах контрольних елементів. Концентрація пилу в області дослідження визначается шляхом чисельного рішення рівняння масопереносу (транспорту) пилу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum_{i=1}^{n} Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i), \qquad (5.14)$$

де *C* – концентрація пилу в повітрі, *u*, *v, w* – складові вектора швидкості вітру, x_i, y_i, z_i – декартові координати джерела емісії, *t* – час, μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти

турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x_i–x)\delta(y_i–y)\delta(y_i–y)$ – дельта-функція Дірака, Q – інтенсивність емісії пилу, w_s – швидкість осідання забруднювача.

Для розв'язку задачі по визначенню концентрації пилу здійснюється розщеплення (5.14) таким чином:

1) крок №1 (k=1/2):

$$\frac{C_{ijk}^{n+k}-C_{ijk}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^+C^{n+k}+L_y^+C^{n+k}+L_z^+C^{n+k}\right)=$$

$$=\frac{1}{4}(M_{xx}^+C^{n+k}+M_{xx}^-C^{k}+M_{yy}^+C^{n+k}+M_{yy}^-C^{n}+M_{zz}^+C^{n+k}+M_{zz}^-C^{n})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_l}{2}\delta_l;$$

2) крок №2 (k=n+1; c=n+1/2):

$$\frac{C_{ijk}^{k}-C_{ijk}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^-C^{k}+L_y^-C^{k}+L_z^-C^{k}\right)=$$

$$=\frac{1}{4}(M_{xx}^+C^{k}+M_{xx}^-C^{c}+M_{yy}^+C^{k}+M_{yy}^-C^{c}+M_{zz}^+C^{k}+M_{zz}^-C^{c})+\sum_{l=1}^{N}\frac{Q_l}{2}\delta_l.$$

Концентрація пилу визначається на кожному кроці за явною формулою.

В даних залежностях використано такі позначення:

$$\frac{\partial u^+C}{\partial x}\approx\frac{u_{i+1,j,k}^+C_{i,j,k}^{n+1}-u_{i,j,k}^+C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x}=L_x^+C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^-C}{\partial x}\approx\frac{u_{i+1,j,k}^-C_{i+1,j,k}^{n+1}-u_{i,j,k}^-C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x}=L_x^-C^{n+1},$$

$$u^+=\frac{u+|u|}{2},\ u^-=\frac{u-|u|}{2},$$

$$v^+=\frac{v+|v|}{2},\ v^-=\frac{v-|v|}{2}$$

і т. д.

Тут і далі використовується позначення: w=w–w_s.

На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерний код, мова програмування – FORTRAN.

Склад комп'ютерного коду :

– Q78T.DAT – файл даних для розрахунку 3D концентраційного поля на промисловому майданчику;

– Q78T*1* – розрахунок 3D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

– Q78T*2* – розрахунок 3D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q78T3 – побудова граничних умов для 3D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q78T4 – побудова граничних умов для 3D області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q78T5 – розрахунок 3D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику (перший крок розщеплення ,підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q79T5 – розрахунок 3D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику (другий крок розщеплення, підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

Для верифікації побудованої моделі аеродинаміки (чисельна модель на базі метода А. Самарського) використовувалось аналітичне рішення тривимірного рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right).$$

Порівняння також зроблено з чисельним розрахунком Оладіпо Мутіо Олатойє. Параметри для розрахунку:

1. Прямокутна область.

2. Область $0<x<\infty$, $0<y<\infty$, $0<z<\infty$.

3. Граничні умови T=0 °С на границях $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$.

4. Початкова умова $T=T_0$, де T_0=300 ^{0}С.

5. Розміри розрахункової області: 12м×12м×12м.

6. Коефіцієнт температуропровідності a=1.

7. Розрахункова точка: x=1 м, y=1 м.

Аналітичний розв’язок рівняння теплопровідності записується так (А. Д. Полянін):

$$T = T_0 erf\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \cdot erf\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) \cdot erf\left(\frac{z}{2\sqrt{at}}\right).$$

Результати розрахунку наведено нижче в табл. 5.6.

Таблиця 5.6 – Динаміка зміни температури

t, с	Аналітичний розв'язок	Чисельне рішення (Оладіпо М. О./розроблена модель)
2	15,19 ℃	15,24 ℃/15,33 ℃
4	5,90 ℃	6,01 ℃/6,14 ℃
6	3,28 ℃	3,33 ℃/3.41 ℃

Таким чином, результати проведеного обчислювального експерименту підтверджують адекватність розробленої моделі.

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Формування блоку початкових даних (місце розташування бар'єру, геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т. д.).

2. Рішення 3D чисельної моделі аеродинаміки.

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів.

4. Рішення 3D чисельної моделі масопереносу (визначення температурних полів).

5. Виведення «на друк» поля температури.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні наступні дані:

1. Геометрична форма захисного бар'єру.

2. Розміри захисного бар'єру.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення.

4. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

7. Крок за часом.

8. Розміри 3D розрахункової сітки.

9. Розміри 3D розрахункової області.

Особливості розробленої 3D CFD моделі:

1. Можливість рішення 3D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для довільної кількості захисних бар'єрів.

2. Можливість рішення 3D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для різних розмірів та місць розташуванні бар'єрів, тобто обмежень немає.

3. Можливість рішення 3D задачі масопереносу при будь-якій формі поверхні пилоутворення та при довільному її розташуванні відносно захисного бар'єру.

4. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення (наприклад, користувач задає математичну залежність інтенсивності пилоутворення при різній локальній швидкості повітряного потоку або задає інтенсивність такої емісії як «константу» при дефіциті даних відносно цього параметру та при використанні літературних джерел).

5. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення в залежності від різної локальної швидкості повітряного потоку над поверхнею пилоутворення.

Нижче наведено результати рішення 3D задачі. Для проведення комп'ютерного експерименту використовувалися такі дані:

1. Геометрична форма захисного бар'єру – бар'єр з додатковим горізонтальним елементом.

2. Розміри захисного бар'єру: висота 4 м, ширина 4,5 м, висота 3,3 м.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення – перед захисним бар'єром.

4. Інтенсивність пилоутворення 100 од (безрозмірне значення).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку 6 м/с.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,001 м/с

7. Крок за часом 0,1 с

8. Розміри 3D розрахункової сітки 12×12×12 контрольних елементів.

9. Розміри 3D розрахункової області 15 м×9 м×10 м.

10. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,001 м/с.

Нижче на рисунках показано концентрацію пилу в області дослідження для двох перерізів (y=4 м та z=2,5 м – рівень розташування горизонтального елементу): кожне число показує безрозмірну концентрацію від максимальної концентрації в перерізі. Максимум концентрації – це число «99». Тобто, наприклад, число «17» – це 17 % від максимальної концентрації пилу.

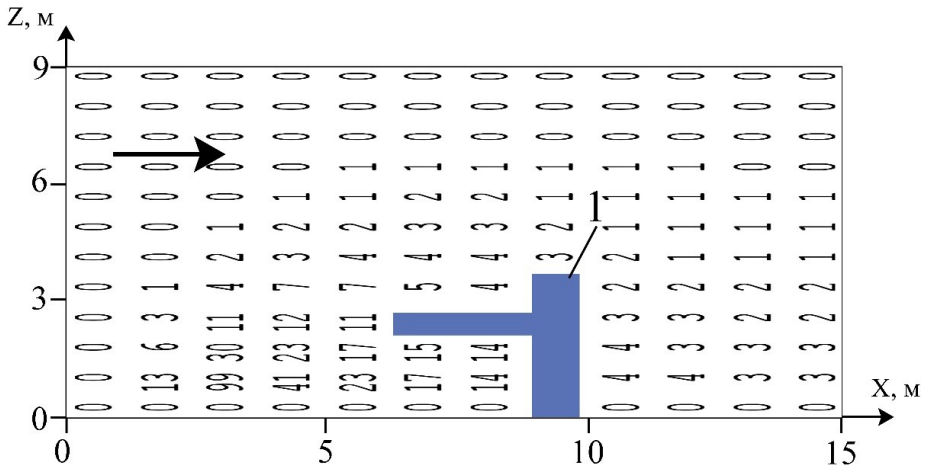


Рисунок 5.36 – Поле концентрації пилу, результат CFD моделювання (переріз y=4 м).

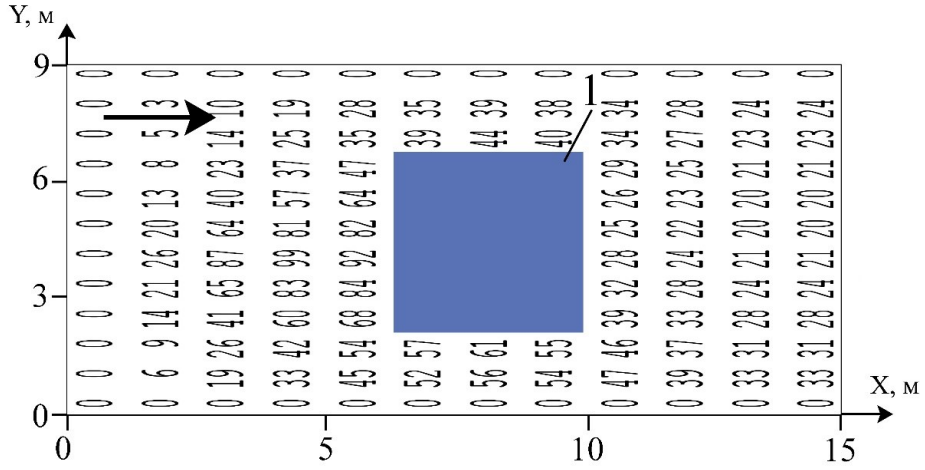


Рисунок 5.37 – Поле концентрації пилу, результат CFD моделювання (переріз z=2,5 м).

Аналіз результатів CFD моделювання показує, що під горизонтальним елементом відбувається накопичення пилу. Концентрація пилу частко локалізується перед бар'єром.

Відзначимо, що час розрахунку – 5 с.

5.3 Дослідження аеродинаміки повітряних потоків на промисловому майданчику при використанні бар'єру, що має додатковий елемент типу «сходинка»

В лабораторії кафедри «Гідравліка, водопостачання та фізика» УДУНТ було проведено комплекс експериментальних досліджень по визначенню аеродинаміки повітряних потоків на моделі промислового майданчика, де розташований захисний бар'єр, що має додатковий елемент типу «сходинка». На першому етапі дослідження здійснювався аналіз впливу захисного бар'єру на аеродинаміку. Фізичний експеримент проводився при тих же умовах, що були описані в попередніх параграфах, моделювання здійснювалося на базі критерію Рейнольдса.

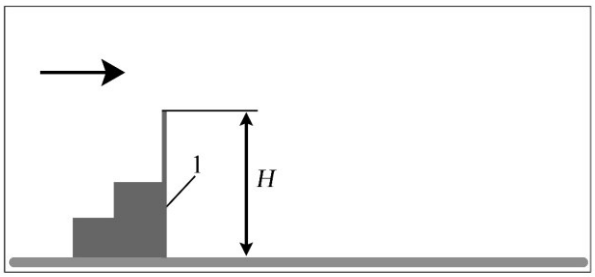


Рисунок 5.38 – Схема фізичної моделі захисного бар'єру:
1 – захисний бар'єр зі сходинкою (H=10 см).

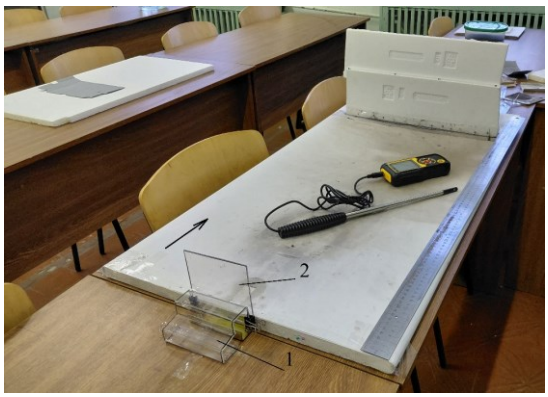


Рисунок 5.39 – Фото моделі захисного бар’єру, що має додатковий елемент типу «сходинка»: 1 – «сходинки»; 2 – захисний бар’єр.

На рис. 5.40 показано значення швидкості повітряного потоку за бар’єром. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті 0,1H.

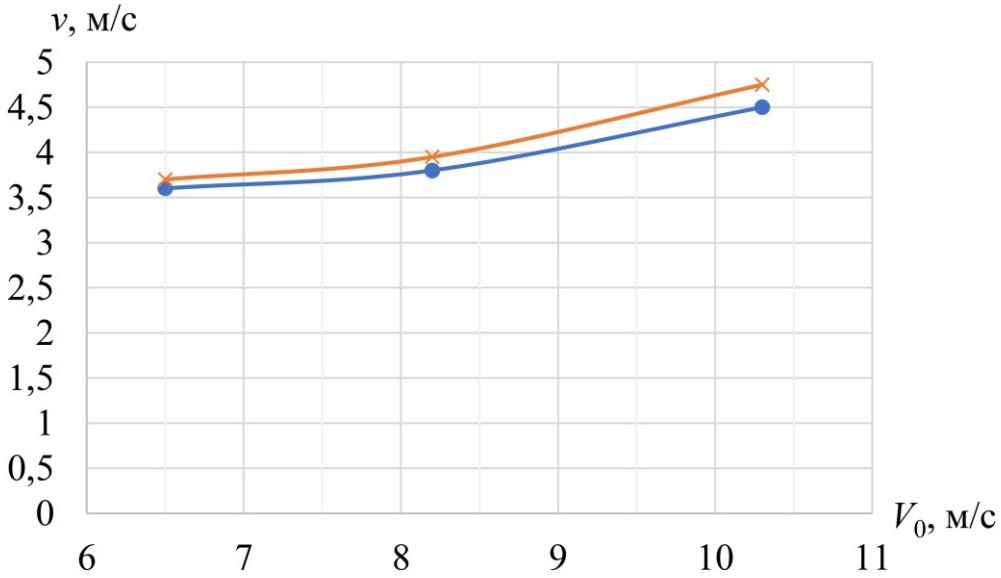


Рисунок 5.40 – Швидкість повітряного потоку за бар’єром:
× – розрахунок за розробленою моделлю.

Обробка експериментальних даних дозволяє отримати емпіричну модель, яка може бути застосована для визначення швидкості повітряного потоку за захисним бар’єром на висоті 0,1H і на відстані 0,5H від бар’єру:

$$v = 0{,}0568 \cdot V_0^2 - 0{,}7167 V_0 + 5{,}8606 \qquad (5.15)$$

де V_0 – швидкість повітряного потоку перед бар’єром.

На рис. 5.40 також показано значення швидкості за розрахунком на базі розробленої CFD моделі, побудова якої розглядається нижче.

Далі, на рис. 5.41 показано зміну значення швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром вздовж моделі промислового майданчику. Вимірювання швидкості повітряного потоку здійснювалась на висоті 0,1H.

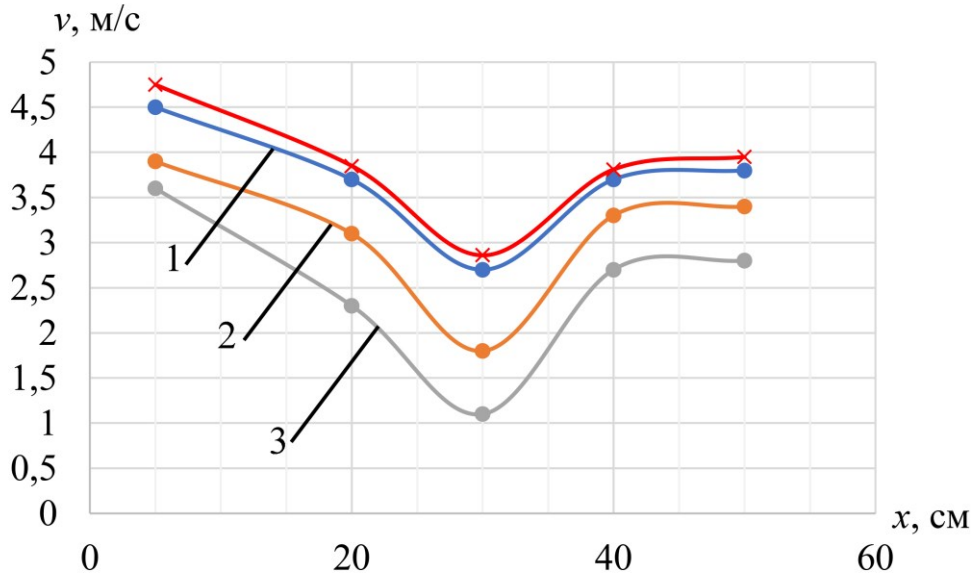


Рисунок 5.41 – Зміна швидкості повітряного потоку за захисним бар'єром: 1 – 10,3 м/с; 2 – 8,2 м/с; 3 – 6,5 м/с; × – розрахунок за розробленою моделлю (V_0=10,3 м/с).

Результати, що наведені на рис. 5.41, дають можливість визначити таку закономірність: за захисним бар'єром даного типу швидкість повітряного потоку зменшується та досягає мінімуму на відстані порядку 3H від захисного бар'єру, далі починається зростання локальної швидкості повітряного потоку.

Комплексний аналіз результатів фізичних експериментів для бар'єрів різного типу, що були експериментально досліджені в даному розділі, показує наступну закономірність для усіх типів захисних бар'єрів: аеродинаміка повітряного потоку за захисним бар'єром характеризується наявністю точки «екстремуму» – тобто, на певній відстані від захисного бар'єру є ділянка, на якій спочатку відбувається зменшення швидкості повітряного потоку, далі досягається мінімальне значення швидкості та починається її ріст. Відстань від

захисного бар'єру до даної точки «екстремуму» є різною для різних типів бар'єрів.

Далі були побудовані чисельні моделі для розрахунку концентраційних полів пилу на промисловому майданчику при використанні захисного бар'єру даної геометричної форми. На першому етапі побудована 2D чисельна модель.

Моделюючим рівнянням аеродинаміки є наступне рівняння [41]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0.$$

Для моделюючого рівняння аеродинаміки ставляться відповідні граничні умови [41]:

– на межі, де потік входить у розрахункову область, для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Неймана $\frac{\partial P}{\partial x} = U$, де U – відоме значення швидкості вітрового потоку;

– на межі, де потік виходить з розрахункової області, для потенціалу швидкості ставиться гранична умова Діріхле $P = P_0 + const$, де P_0 – деяка числова константа;

– на верхній межі, тверда непроникна стінка, ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на нижній межі, тверда непроникна стінка (бар'єр), ставиться умова непроникнення $\frac{\partial P}{\partial y} = 0$;

– на всіх твердих стінках виконуватиметься умова непроникнення.

Якщо відомі поля потенціалу швидкості, то для визначення компонент вектора швидкості повітряного потоку використовуються такі залежності:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

Чисельне інтегрування моделюючого рівняння аеродинаміки, а також для чисельного інтегрування іншого диференціального рівняння масопереносу,

використовується прямокутна різницева сітка. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується його запис у еволюційному вигляді :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}.$$

де t – фіктивний час, при $t \to \infty$ розв'язок цього рівняння наближається до розв'язку рівняння Лапласа для потенціалу швидкості.

На наступному кроці виконується геометричне розщеплення еволюційного рівняння наступним чином:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}.$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}.$$

Для розрахунку значення потенціалу швидкості P на базі першого одновимірного рівняння використовується така залежність:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2}.$$

Для розрахунку значення потенціалу швидкості P на базі другого одновимірного рівняння застосовується залежність :

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \Delta t \frac{P_{i,j+1}^{n} - P_{i,j}^{n}}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Розрахунок виконується, поки не буде виконана умова:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації.

Процес розповсюдження пилового забруднення моделюється на базі рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) +$$
$$+ \sum q_i \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i),$$

де C – концентрація пилу в повітрі, u, v – складові вектора швидкості вітру, x_i, y_i

– декартові координати джерела емісії пилу, t – час, μ_x, μ_y – коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x_i–x)\delta(y_i–y)$ – дельта-функція Дірака, q_i – інтенсивність емісії пилу, w_s – швидкість гравітаційного осадження пилу.

Для чисельного інтегрування рівняння масопереносу застосовуються наступні перетворення :

$$\frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial u^{+}C}{\partial x} + \frac{\partial u^{-}C}{\partial x},$$

$$\frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial v^{+}C}{\partial y} + \frac{\partial v^{-}C}{\partial y},$$

$$u^{+} = \frac{u+|u|}{2}, u^{-} = \frac{u-|u|}{2},$$

$$v^{+} = \frac{v+|v|}{2}, v^{-} = \frac{v-|v|}{2},$$

$$\frac{\partial u^{+}C}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j}C^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j}C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^{-}C}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j}C^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{+}C}{\partial y} \approx \frac{v^{+}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j} - v^{+}_{i,j}C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^{-}C}{\partial y} \approx \frac{v^{-}_{i,j+1}C^{n+1}_{i,j+1} - v^{-}_{i,j}C^{n+1}_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y}C^{n+1}.$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n}_{ij}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C^{n+1}_{i+1,j} - C^{n+1}_{ij}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x^2} = M^{-}_{xx}C^{n+1} + M^{+}_{xx}C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) \approx \tilde{\mu}_y \frac{C^{n+1}_{i,j+1} - C^{n+1}_{ij}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C^{n+1}_{ij} - C^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y^2} = M^{-}_{yy}C^{n+1} + M^{+}_{yy}C^{n+1}.$$

Тоді можна записати аналог рівняння масопереносу в різницевому вигляді:

$$\frac{C_{ij}^{n+1}-C_{ij}^{n}}{\Delta t}+L_x^+C^{n+1}+L_x^-C^{n+1}+L_y^+C^{n+1}+L_y^-C^{n+1}=$$
$$=M_{xx}^+C^{n+1}+M_{xx}^-C^{n+1}+M_{yy}^+C^{n+1}+M_{yy}^-C^{n+1}+q_{ij}\delta_{ij}.$$

Параметр δ_{ij} дорівнює 1, якщо в різницевій комірці є джерело забруднення, та 0, якщо в комірці немає джерела забруднення.

Зауважимо, що в даному записі використовується така залежність:

$$q_{ij}=\frac{q_i}{\Delta x\Delta y},$$

де q_i – інтенсивність джерела емісії пилу.

Далі здійснюється розщеплення наступним чином:

– крок 1 (k=n+1/4):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{n}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^+C^k+L_y^+C^k\right)=\frac{1}{4}\left(M_{xx}^+C^k+M_{xx}^-C^k+M_{yy}^+C^n+M_{yy}^-C^n\right)+\sum_{l=1}^{N}\frac{q_l}{4}\delta_l;$$

– крок 2 (k=n+1/2; c=n+1/4):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^-C^k+L_y^-C^k\right)=\frac{1}{4}\left(M_{xx}^-C^k+M_{xx}^+C^c+M_{yy}^-C^k+M_{yy}^+C^c\right)+\sum_{l=1}^{N}\frac{q_l}{4}\delta_l;$$

– крок 3 (k=n+3/4; c=n+1/2):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^+C^k+L_y^-C^k\right)=\frac{1}{4}\left(M_{xx}^+C^c+M_{xx}^-C^k+M_{yy}^-C^k+M_{yy}^+C^c\right)+\sum_{l=1}^{N}\frac{q_l}{4}\delta_l;$$

– крок 4 (k=n+1; c=n+3/4):

$$\frac{C_{ij}^{k}-C_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_x^-C^k+L_y^+C^k\right)=\frac{1}{4}\left(M_{xx}^-C^k+M_{xx}^+C^c+M_{yy}^+C^c+M_{yy}^-C^k\right)+\sum_{l=1}^{N}\frac{q_l}{4}\delta_l;$$

Особливістю розглянутої схеми розщеплення є те, що на кожному розрахунковому кроці концентрація пилу визначається за явною формулою.

На наступному етапі була здійснена програмна реалізація побудованих чисельних моделей аеродинаміки та масопереносу. Створено комп’ютерний код «VK62-2D». Розробка коду здійснена на мові FORTRAN. Склад комп’ютерного коду:

– QTT.DAT – файл даних для розрахунку концентраційного поля на промисловому майданчику;

– QT*1* – розрахунок поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

– QT*2* – розрахунок швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

– QT3 – побудова граничних умов для області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE») ;

– QT4 – побудова граничних умов для області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– QT5 – розрахунок концентраційного поля пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Введення початкових даних (геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т. д.).

2. Рішення чисельної моделі аеродинамики.

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів.

4. Рішення чисельної моделі масопереносу.

5. Виведення «на друк» поля концентрації пилу на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні наступні дані:

1. Геометрична форма захисного бар'єру.

2. Розміри захисного бар'єру.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення.

4. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

7. Крок за часом.

8. Розміри розрахункової сітки.

9. Розміри розрахункової області.

Особливості розробленої CFD моделі:

1. Можливість розрахунку аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для довільної кількості захисних бар'єрів.

2. Можливість розрахунку аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику не тільки для «тонких » бар'єрів, тобто, коли висота бар'єру значно перевищує його товщину, але і для захисних перешкод, що мають товщину, яка співставна з висотою перешкоди (на рис. 5.42 показано приклад використання розробленої моделі для аналізу концентраційного поля домішки в розрахункової області, що має складну геометричну форму та три перешкоди, що впливають на аеродинаміку потоку).

3. Можливість розрахунку масопереносу при будь-якій формі поверхні пилоутворення та при будь-якому її розташуванні відносно захисного бар'єру.

4. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення (наприклад, користувач задає математичну залежність інтенсивності пилоутворення при різній локальній швидкості повітряного потоку або задає інтенсивність такої емісії як «константу» при дефіциті даних відносно цього параметру та при використанні літературних джерел).

5. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення в залежності від різної локальної швидкості повітряного потоку над поверхнею пилоутворення.

Нижче на рис. 5.42 показано результат рішення модельної задачі по визначенню області забруднення повітря при наявності в розрахунковій області комплексу перешкод. Параметри, для яких було здійснено розрахунок, наведено в (*УЖБА № 6 2024 В9 или В7)*

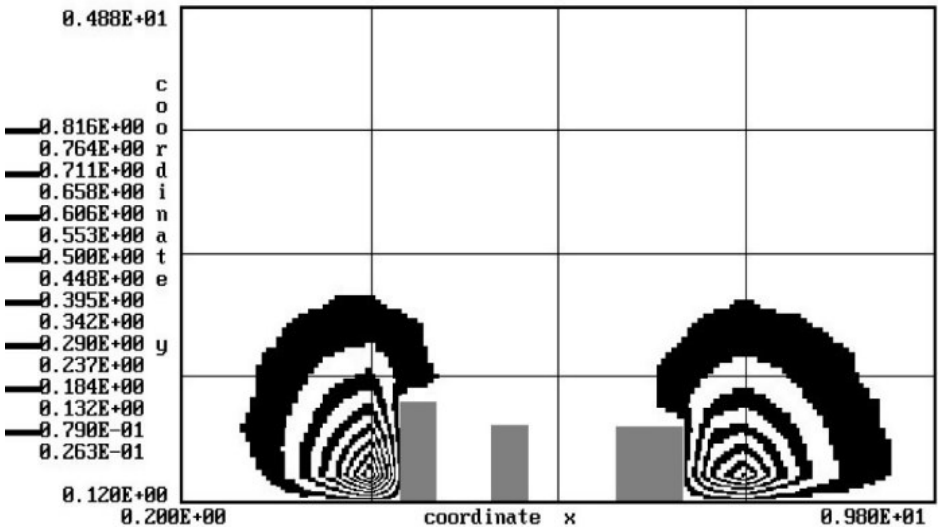


Рисунок 5.42 – Концентраційне поле домішки, розрахунок на базі розробленої CFD моделі (*УЖБА № 6 2024)*.

Як можна бачити з наведеного рисунку, що відображає поле концентрації домішки в області дослідження, розроблена CFD модель дає можливість здійснити розрахунок в області, що має складну геометричну форму без втрати стійкості.

Нижче наведено результати 2D комп’ютерного експерименту по визначенню концентрації пилу на промисловому майданчику при використанні захисного бар’єру, що має додатковий елемент типу «сходинки». Комп’ютерне моделювання виконано при таких даних:

1. Розміри розрахункової області 25 м × 10,5 м.
2. Розмір розрахункової сітки 25 × 21 контрольний елемент.
3. Швидкість вітру 7 м/с.
4. Довжина області пилоутворення 6 м.
5. Інтенсивність пилоутворення 100 од (в безрозмірному вигляді).
6. Ширина бар’єру 1 м.
7. Висота бар’єру 5 м
8. Довжина нижньої сходинки 4 м.
9. Висота нижньої сходинки 0.5 м
10. Висота другої сходинки 2 м.

11. Довжина другої сходинки 2 м.

12. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу 0,001 м/с .

Схему розрахункової області показано на рис. 5.43. Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді: кожне число показує у відсотках значення концентрації пилу від її максимального значення. Таким чином, числу «99» відповідає максимальне значення концентрації пилу.

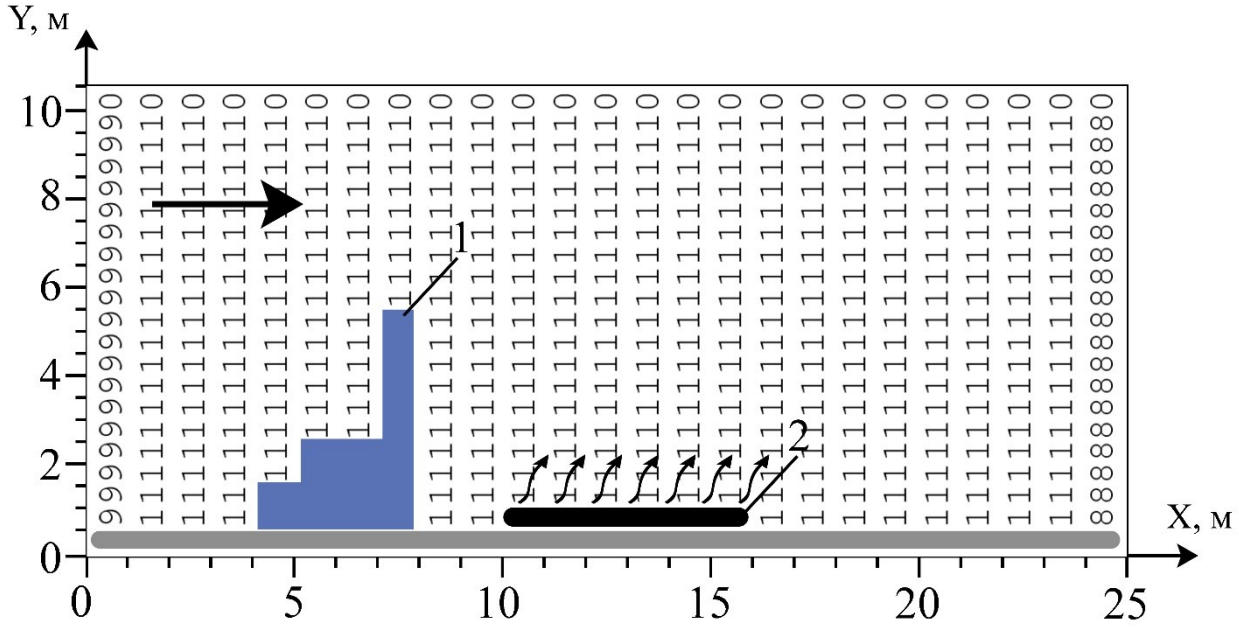


Рисунок 5.43 – Схема розрахункової області:

1 – захисний бар’єр; 2 – область пилоутворення.

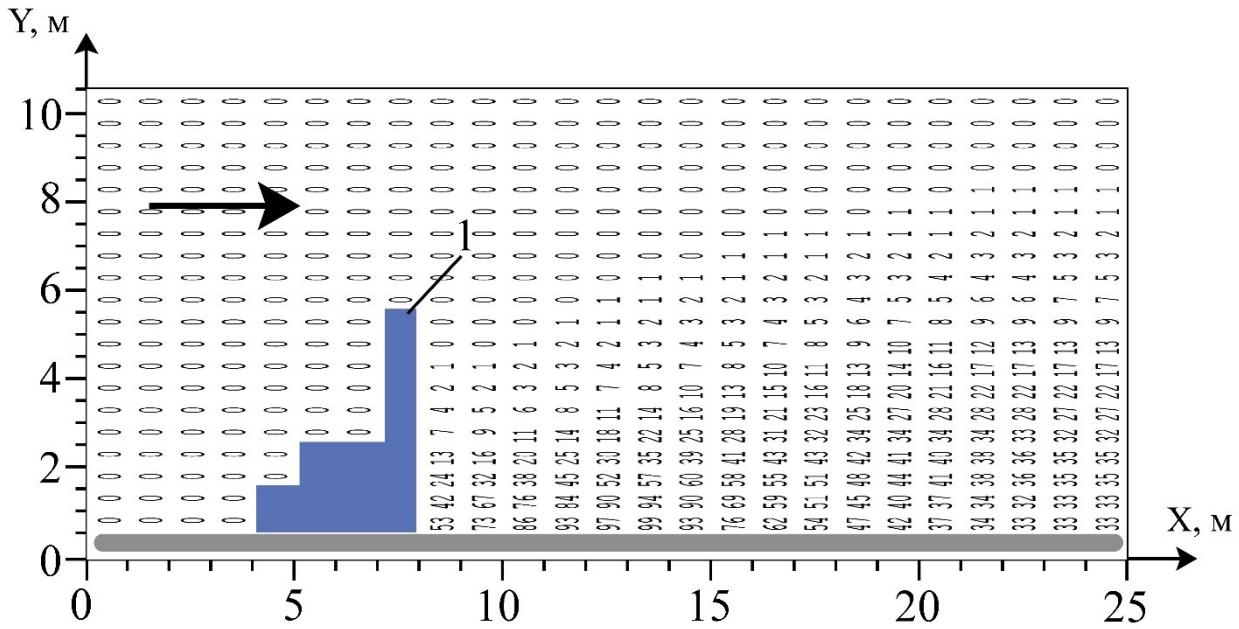


Рисунок 5.44 – Поле концентрації пилу на промисловому майданчику:
1 – захисний бар'єр.

Аналіз даних, що наведені на рис. 5.44, показує, що при використанні захисного бар'єру даного типу 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 витягується вздовж поверхні землі.

На другому етапі була побудована 3D чисельна модель для прогнозування пилового забруднення повітря на промисловому майданчику при використанні захисного бар'єру даного типу.

Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку використовується тривимірне рівняння для потенціалу швидкості:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = 0,$$

де P – потенціал швидкості, на базі якого розраховується поле швидкості повітряного потоку:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x},\ v = \frac{\partial P}{\partial y},\ w = \frac{\partial P}{\partial z}.$$

Граничні умови для рівняння аеродинаміки розглянуто раніше.

Для чисельного інтегрування рівняння аеродинаміки здійснюється його приведення до «нестаціонарного» вигляду (тобто, вводиться фіктивний час t) , а далі використовується наступна двокрокова схема розщеплення (схема умовної апроксимації, чисельна модель № 1):

- перший крок:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta t} = \frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2};$$

- другий крок:

$$\frac{P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \frac{P_{i+1,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1}^{n+1} - P_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2}.$$

Значення потенціалу швидкості визначається за явною формулою.

Обчислення закінчуються при виконанні наступної умови:

$$\left| P_{ijk}^{n+1} - P_{ijk}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число (ε=0,001), *n* – номер ітерації.

Для контролю проведення розрахунків також була побудована ще одна 3D чисельна модель аеродинаміки, в якій для чисельного рішення рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використовується ще одна схема рішення – локально-одновимірна різницева схема (чисельна модель №2). Для побудови чисельної моделі аеродинаміки на базі цієї схеми здійснюється геометричне розщеплення тривимірного рівняння для потенціалу:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}.$$

Далі, для визначення невідомого значення *P* на базі цих одновимірних рівнянь використовуються такі залежності:

– для першого рівняння:

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^{n} + P_{i-1,j,k}^{n}}{\Delta x^2};$$

– для другого рівняння :

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta y^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j-1,k}^{n}}{\Delta y^2};$$

– для третього рівняння :

$$P_{i,j,k}^{n+1} = P_{i,j,k}^{n} + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^{n} - P_{i,j,k}^{n}}{\Delta z^2} + \Delta t \frac{-P_{i,j,k}^{n} + P_{i,j,k-1}^{n}}{\Delta z^2}.$$

Розрахунок на базі цих різницевих залежностей закінчується при виконанні умови, що наведена вище для рішення «нестаціонарного» рівняння для потенціалу швидкості.

На кожному кроці розщеплення потенціал швидкості розраховується за явною формулою. Компоненти вектора швидкості повітря розраховуються так:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}, v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y}, w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку використовуються для розрахунку концентрації домішки в області дослідження. Для цього використовується таке рівняння масопереносу:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}\right) +$$
$$+ \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z}\right) + \sum_{i=1}^{n} Q_i(t) \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i),$$

де C – концентрація пилу в повітрі, u, v, w – складові вектора швидкості вітру, x_i, y_i, z_i – декартові координати джерела емісії, t – час, μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти турбулентної дифузії в атмосфері, $\delta(x_i–x)\delta(y_i–y)\delta(y_i–y)$ – дельта-функція Дірака, $Q_i(t)$ – інтенсивність емісії пилу, w_s – швидкість осідання забруднювача.

Граничні умови для моделюючого рівняння масопереносу розглянуті раніше.

На вході в розрахункову область задається профіль швидкості повітряного потоку:

$$u = u_1 \left(\frac{\lg \frac{z}{z_0}}{\lg \frac{z_1}{z_0}} \right),$$

де u_1 – швидкість вітру на висоті z_1, z_0 – шорсткість.

Коефіцієнти дифузії розраховуються за емпіричними залежностями, що розглянуті вище.

Для побудови різницевої схеми з метою чисельного розв’язання тривимірного рівняння масопереносу здійснюється наступне його розщеплення:

$$\frac{\partial C}{\partial t}+\frac{\partial uC}{\partial x}+\frac{\partial vC}{\partial y}+\frac{\partial wC}{\partial z}=0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_x\frac{\partial C}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\mu_y\frac{\partial C}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\mu_z\frac{\partial C}{\partial z}\right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t}=\sum_{i=1}^{N}Q_i\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(\mathrm{z}-z_i).$$

Далі має місце наступне розщеплення рівняння масопереносу пилу:

$$\begin{cases}
\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{+}\overset{1}{C})+\frac{1}{4}\sigma\overset{1}{C}=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{1x}\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{1y}\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{1z}\frac{\partial \overset{1}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{-}\overset{2}{C})+\frac{1}{4}\sigma\overset{2}{C}=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{2x}\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{2y}\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{2z}\frac{\partial \overset{2}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{-}\overset{3}{C})+\frac{1}{4}\sigma\overset{3}{C}=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{2x}\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{2y}\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{2z}\frac{\partial \overset{3}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial t}+\frac{1}{2}div(\vec{V}^{+}\overset{4}{C})+\frac{1}{4}\sigma\overset{4}{C}=\frac{1}{4}\left(\frac{\partial}{\partial x}(\overline{\mu}_{1x}\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(\overline{\mu}_{1y}\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(\overline{\mu}_{1z}\frac{\partial \overset{4}{C}}{\partial z})\right);\\
\frac{\partial \overset{5}{C}}{\partial t}=\sum_{i=1}^{n}Q_i(t)\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i).
\end{cases}$$

В даній системі рівнянь використовуються позначення:

$$\vec{V}^{+}=\{u^{+},v^{+},w^{+}\},\vec{V}^{-}=\{u^{-},v^{-},w^{-}\},$$

$$u^{+}=\frac{u+|u|}{2},u^{-}=\frac{u-|u|}{2},v^{+}=\frac{v+|v|}{2},v^{-}=\frac{v-|v|}{2},w^{+}=\frac{w+|w|}{2},w^{-}=\frac{w-|w|}{2},$$

$$\overline{\mu}_{1x}=\frac{\mu}{1+\frac{u^{+}\Delta x}{\mu}},\overline{\mu}_{1y}=\frac{\mu}{1+\frac{v^{+}\Delta y}{\mu}},\overline{\mu}_{1z}=\frac{\mu}{1+\frac{w^{+}\Delta z}{\mu}},\overline{\mu}_{2x}=\frac{\mu}{1-\frac{u^{-}\Delta x}{\mu}},\overline{\mu}_{2y}=\frac{\mu}{1-\frac{v^{-}\Delta y}{\mu}},\overline{\mu}_{2z}=\frac{\mu}{1-\frac{w^{-}\Delta z}{\mu}}.$$

Кожне рівняння системи описує один напрямок переносу забруднень через грані різницевої комірки. Різницевий аналог даної системи записується так (В. К. Хрущ, М. М. Біляєв):

– перший крок:

$$\frac{{}^{1}C_{ijk}^{n+1}-{}^{1}C_{ijk}^{n}}{\Delta t}+(L_x^{+}+L_y^{+}+L_z^{+})({}^{1}C_{ijk}^{n+1}\,\xi+{}^{1}C_{ijk}^{n}(1-\xi))=$$

$$=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}(M_{xx}^{+}+M_{yy}^{+}+M_{zz}^{+})\,{}^{1}C_{ijk}^{n+1}+\\+(M_{xx}^{-}+M_{yy}^{-}+M_{zz}^{-})\,{}^{1}C_{ijk}^{n}\end{bmatrix},$$

де $\xi\in[0,1]$ – параметр ${}^{1}C_{ijk}^{n+1/2}=\dfrac{{}^{1}C_{ijk}^{n+1}+{}^{1}C_{ijk}^{n}}{2}$;

– другий крок:

$$\frac{{}^{2}C_{ijk}^{n+1}-{}^{2}C_{ijk}^{n}}{\Delta t}+(L_x^{-}+L_y^{-}+L_z^{-})({}^{2}C_{ijk}^{n+1}\,\xi+{}^{2}C_{ijk}^{n}(1-\xi))=$$

$$=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\left(M_{xx}^{-}+M_{yy}^{-}+M_{zz}^{-}\right){}^{2}C_{ijk}^{n+1}+\\+\left(M_{xx}^{+}+M_{yy}^{+}+M_{zz}^{+}\right){}^{2}C_{ijk}^{n}\end{bmatrix};$$

– третій крок:

$$\frac{{}^{2}C_{ijk}^{n+1}-{}^{2}C_{ijk}^{n}}{\Delta t}+(L_x^{-}+L_y^{-}+L_z^{-})({}^{2}C_{ijk}^{n+1}\,\xi+{}^{2}C_{ijk}^{n}(1-\xi))=$$

$$=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}\left(M_{xx}^{-}+M_{yy}^{-}+M_{zz}^{-}\right){}^{2}C_{ijk}^{n+1}+\\+\left(M_{xx}^{+}+M_{yy}^{+}+M_{zz}^{+}\right){}^{2}C_{ijk}^{n}\end{bmatrix};$$

– четвертий крок:

$$\frac{{}^{1}C_{ijk}^{n+1}-{}^{1}C_{ijk}^{n}}{\Delta t}+(L_x^{+}+L_y^{+}+L_z^{+})({}^{1}C_{ijk}^{n+1}\,\xi+{}^{1}C_{ijk}^{n}(1-\xi))=$$

$$=\frac{1}{4}\begin{bmatrix}(M_{xx}^{+}+M_{yy}^{+}+M_{zz}^{+})\,{}^{1}C_{ijk}^{n+1}+\\+(M_{xx}^{-}+M_{yy}^{-}+M_{zz}^{-})\,{}^{1}C_{ijk}^{n}\end{bmatrix};$$

– п’ятий крок записується так:

$$\frac{{}^{5}C_{ijk}^{n+1}-{}^{5}C_{ijk}^{n}}{\Delta t}=\sum_{i=1}^{n}\frac{Q_i(t^{n+1/2})\delta(x-x_i)\delta(y-y_i)\delta(z-z_i)}{\Delta x\Delta y\Delta z}.$$

В дискретному виді дельта-функція Дірака «розмазується» по об’єму різницевої комірки із збереженням сумарної кількості забруднення, дельта-

функція дорівнює нулю скрізь, крім комірок, де розташоване *i*-те джерело забруднення.

В різницевих рівняннях використовуються такі оператори [13, 22, 41]:

$$L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}}{2\Delta x}, L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta x},$$

$$L_y^+ = \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{ijk} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}}{2\Delta y}, L_y^- = \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta y},$$

$$L_z^+ = \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{ijk} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{2\Delta x}, L_z^- = \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{2\Delta z}.$$

На базі розробленої чисельної моделі створено комп'ютерний код, мова програмування – FORTRAN.

Склад комп'ютерного коду:

– Q3T.DAT – файл даних для розрахунку 3D концентраційного поля на промисловому майданчику;

– Q3T1 – розрахунок 3D поля потенціалу швидкості (схема умовної апроксимації, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q3ST1 – розрахунок 3D поля потенціалу швидкості (локально-одновимірна схема, підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q3T*2* – розрахунок 3D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q3T3 – побудова граничних умов для 3D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q3T4 – побудова граничних умов для 3D області складної геометричної форми при рішенні задачі переносу пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q3T5 – розрахунок 3D концентраційного поля пилу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Введення початкових даних (місце розташування бар'єру, геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т. д.).

2. Рішення 3D чисельної моделі аеродинаміки.

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів.

4. Рішення 3D чисельної моделі масопереносу.

5. Виведення «на друк» поля концентрації пилу на промисловому майданчику в заданому перерізі.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні наступні дані:

1. Геометрична форма захисного бар'єру.

2. Розміри захисного бар'єру.

3. Місце розташування поверхні пилоутворення.

4. Інтенсивність пилоутворення (інтенсивність джерела емісії домішки).

5. Швидкість набігаючого повітряного потоку.

6. Швидкість гравітаційного осадження часток пилу.

7. Крок за часом.

8. Розміри 3D розрахункової сітки.

9. Розміри 3D розрахункової області.

Особливості розробленої 3D CFD моделі:

1. Можливість рішення 3D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для довільної кількості захисних бар'єрів.

2. Можливість рішення 3D задач аеродинаміки повітряного потоку та переносу пилу на промисловому майданчику для різноманітних розмірів «сходинок» та їх розташування біля бар'єру, тобто обмежень немає.

3. Можливість рішення 3D задачі масопереносу при будь-якій формі поверхні пилоутворення та при будь-якому її розташуванні відносно захисного бар'єру.

4. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення (наприклад, користувач задає математичну залежність інтенсивності пилоутворення при різній локальній швидкості повітряного потоку або задає інтенсивність такої

емісії як «константу» при дефіциті даних відносно цього параметру та при використанні літературних джерел).

5. CFD модель враховує різну інтенсивність пилоутворення в залежності від різної локальної швидкості повітряного потоку над поверхнею пилоутворення.

Нижче наведено результати рішення модельної задачі за допомогою розробленої CFD моделі. На рис. 5.45, 5.46 показано розподіл концентрації пилу в області, де розташовано декілька перешкод у вигляді блоків, що мають розміри 30см×25см×30см та розташовуються біля зони пилоутворення. Розрахунок здійснено при таких даних: u_1=4м/с, швидкість осадження пилу 0,002 м/с, z_0=0,02 м. Концентрація пилу на рисунках наведена для рівня z=25 см.

Метою моделювання була перевірка можливості розробленої чисельної моделі здійснювати розрахунок концентраційних полів в умовах складної геометрії області дослідження.

Концентрація пилу наведена в безрозмірному вигляді – кожне число на рисунку показує концентрацію пилу у відсотках від максимальної концентрації в розрахунковій області. Розрахунок здійснено для двох сценаріїв, що відрізняються різним розташуванням захисних блоків.

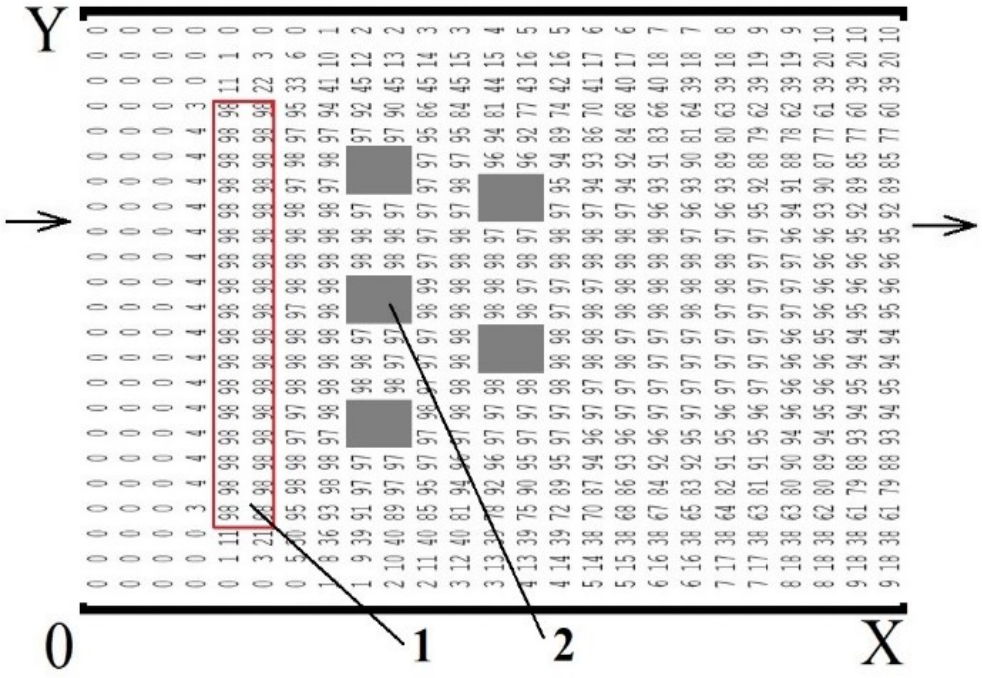


Рисунок 5.45 – Розподіл безрозмірної концентрації пилу (перший сценарій): 1 – зона емісії пилу; 2 – захисні блоки.

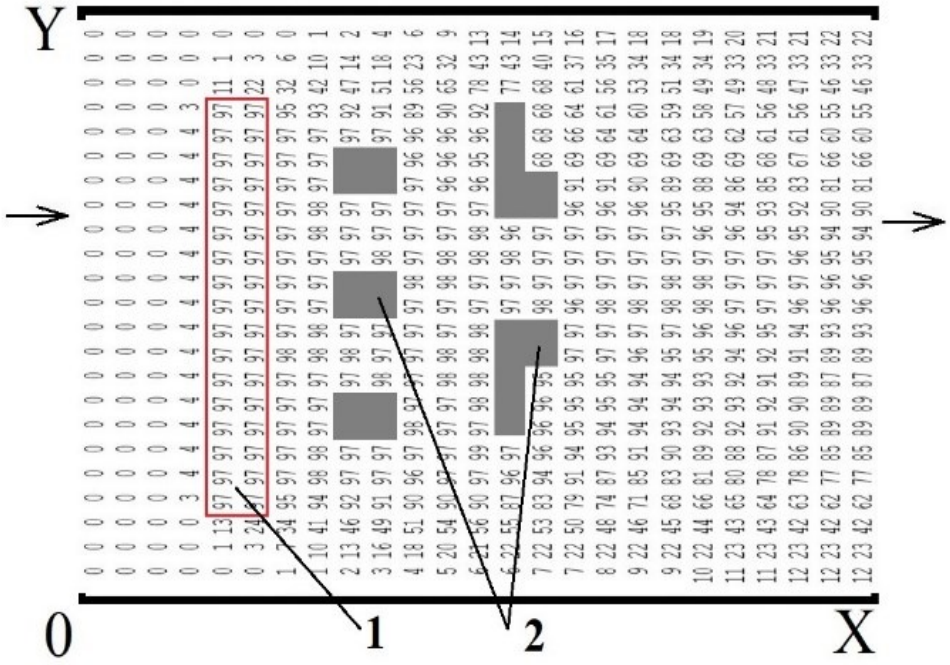


Рисунок 5.46 – Розподіл безрозмірної концентрації пилу (другий сценарій):1 – зона емісії пилу; 2 – захисні блоки.

Як можна бачити з рис. 5.45, 5.46, наявність блоків впливає на формування складної форми області забруднення. Також можна бачити, що розташування блоків як в першому, так і в другому сценарії не є «вдалим», так як за блоками залишається область забруднення з високим значенням концентрації домішки. Таким чином, для більш ефективного розташування захисних блоків потрібно розглянути декілька сценаріїв їх положення біля зони емісії домішки та визначити ефективність шляхом розрахунку на базі розробленої чисельної моделі.

Відзначимо, що час розрахунку складає 7с.

Далі наведено результати комп’ютерного моделювання процесу поширення пилу на промисловому майданчику при використанні захисного бар’єру зі «сходинками». Розрахунок здійснювався при таких параметрах:

1. Розміри розрахункової області 15 м×9 м×10 м.

2. Розмір розрахункової сітки 12 × 12 × 12 контрольний елемент.

3. Швидкість вітру 4 м/с.

4. Довжина області пилоутворення 6 м.

5. Інтенсивність пилоутворення 100 од (в безрозмірному вигляді).

6. Ширина бар'єру 1 м.

7. Висота бар'єру 5 м.

Нижче на рисунку показано безрозмірне поле концентрації пилу (у відсотках) в перерізі y=4,5 м.

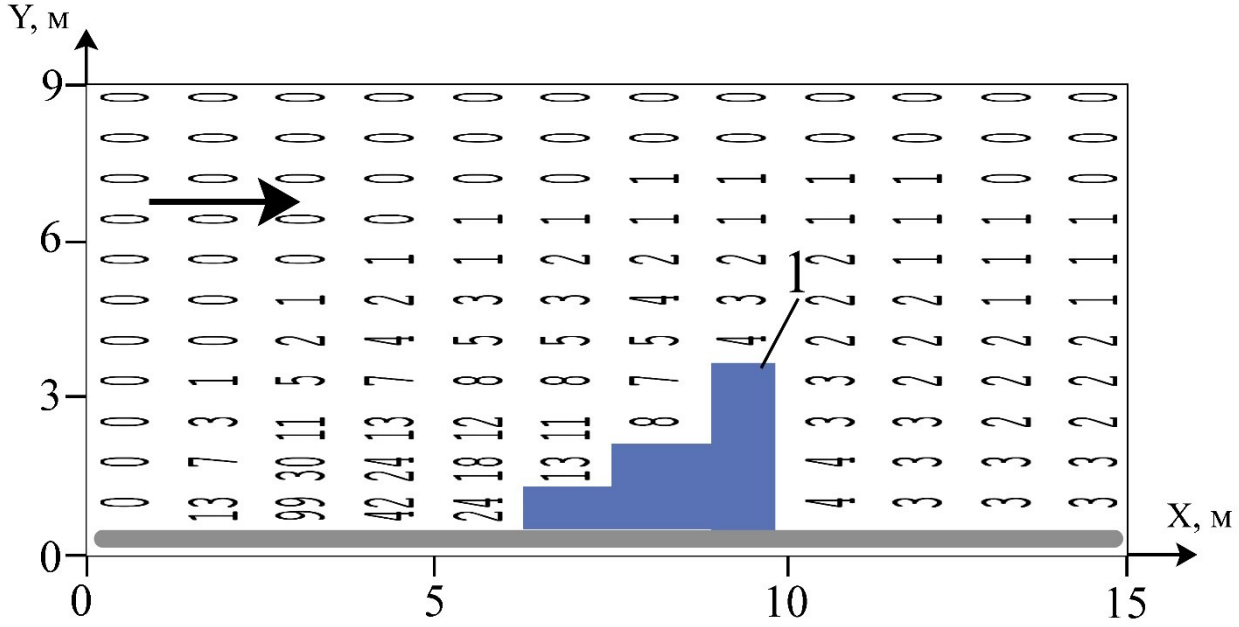


Рисунок 5.47 – Безрозмірне поле концентрації пилу (у відсотках) в перерізі y=4,5 м.

Як можна бачити з наведеного рисунку, перед захисним бар'єром формується інтенсивна область забруднення, за бар'єром – концентрація пилу дорівнює 1-4 % від максимальної концентрації. Тобто, даний бар'єр має досить високу ефективність.

Для верифікації розробленої тривимірної моделі масопереносу була вирішена тестова задача – викид домішки від постійно діючого джерела забруднення. Ця задача має аналітичне рішення по визначенню концентрації домішки на різній відстані від джерела емісії (В. К. Аргученцев):

$$C = \frac{M}{4\pi x\sqrt{k_y k_z}} \exp\left(-\frac{Wy^2}{4kyx}\right) \times \left\{\exp\left[-\frac{W(z+H)^2}{4k_z x}\right] + \exp\left[-\frac{W(z-H)^2}{4k_z x}\right]\right\}.$$

Дані для розрахунку (В. К. Аргученцев):

1. W=4 м/с;

2. K_y=500 м^2/с;

3. Y=0;

4. H=120 м;

5. Z=120 м - розрахунковий рівень; M = 106 мг/с;

6. K_z = 5 м^2/с.

Нижче в табл. 5.7 показані результати рішення даної тестової задачі. В табл. 5.7 також наведені результати чисельного рішення задачі іншими дослідниками (В. К. Аргученцев, Оладіпо Мутіо Олатойе).

Таблиця 5.7 – Концентрація домішки на різної відстані від джерела емісії

X, км	1	2	3	4
C, мг/м^3 (аналітичний розв'язок) (В.К. Аргученцев)	1,59	0,79	0,54	0,42
C, мг/м^3 (розрахунок за розробленою моделлю/ розрахунок за схемою Кранка-Ніколсона, В.К. Аргученцев)	1,75 / 1,8	0,86 / 0,9	0,58 / 0,6	0,47 / 0,5
Аналітичний розв'язок (В.К. Аргученцев)	1,59	0,79	0,54	0,42
$З$, мг/м^3 Розрахунок (В.К. Аргученцев)	1,8	0,9	0,6	0,5
Розрахунок (Оладіпо Мутіо Олатойе)	1,75	0,86	0,58	0,47
Розрахунок на базі розробленої чисельної моделі	1.78	0.87	0.58	0.48

Дані табл. 5.6 дають змогу зробити висновок про адекватність розробленої чисельної моделі.

На наступному етапі проведення досліджень було проведено порівняння розрахункових даних, що отримані на базі розробленої чисельної моделі з результатом експерименту, що був проведений Оладіпо Мутіо Олатойе: емісія негативних іонів від іонізатора. Нижче на рисунку показано фото дослідної установки: модель вагона (масштабі 1:100), позиція іонізатора AirNASA KJF03 (висота розташування h=5 см, інтенсивність емісії становила 10×10^6 частинок/с); швидкість повітряного потоку 0.47-0.54 м/с. Концентрація іонів визначалася за допомогою лічильника AIR ION TESTER KT-401 (вимірювання на висоті 5 см).

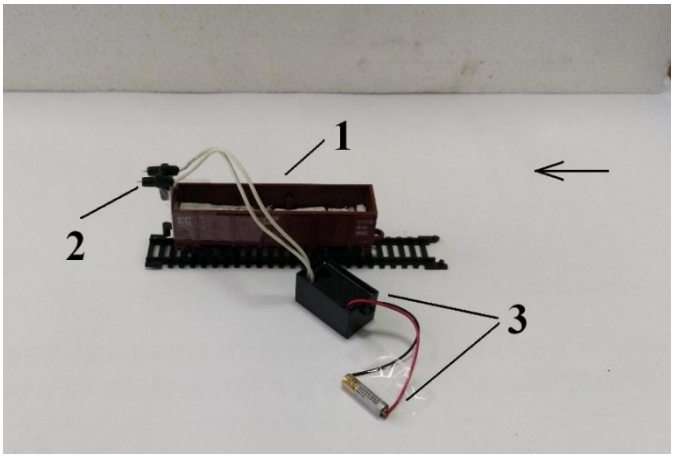


Рисунок 5.48 – Фото дослідної установки (Оладіпо Мутіо Олатойе): 1 – модель напіввагона; 2 – сопло іонізатора повітря; 3 – блок живлення.

Результати вимірювань і розрахунку показані в табл. 5.8

Таблиця 5.8 – Концентрація іонів на різної відстані від джерела емісії

Відстань, x	Експеримент	Розрахункове значення
6 см	$(1{,}39\text{-}1{,}45)\times10^4$ іон/см^3	$1{,}53\times10^4$ іон/см^3
9 см	$(1{,}29\text{-}1{,}35)\times10^4$ іон/см^3	$1{,}42\times10^4$ іон/см^3
18 см	$(1{,}17\text{-}1{,}26)\times10^4$ іон/см^3	$1{,}28\times10^4$ іон/см^3

Дані табл. 5.7 дають змогу зробити висновок про адекватність розробленої чисельної моделі.

Висновки до розділу 5

1. Результати експериментальних досліджень показали, що використання захисних бар'єрів складної геометричної форми дають можливість зменшити швидкість повітряного потоку на певних ділянках промислових майданчиків, що сприяє зменшенню інтенсивності пилоутворення на промисловому майданчику.

2. Експериментальним шляхом встановлено закономірності розподілу приземної швидкості повітряного потоку за захисними бар'єрами складної геометричної форми.

3. На основі отриманих експериментальних даних побудовані емпіричні моделі, що можуть бути використані при інженерних розрахунках по визначенню раціонального місця розташування захисних бар'єрів складної геометричної форми .

4. Розроблено CFD моделі, що дають можливість визначати закономірності розподілу концентрації пилу в робочих зонах на промислових майданчиках при використанні захисних бар'єрів складної геометричної форми. Побудовані моделі враховують геометричну форму захисних бар'єрів, метеоумови, інтенсивність пилоутворення, що залежить від величини локальної швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику; результати комп'ютерних експериментів на базі розроблених моделей дають можливість швидко визначати ефективність їх використання.

5. Розроблені CFD моделі відносяться до класу «operational models» та призначені для швидкого оцінювання ефективності захисних бар'єрів складної геометричної форми на етапі проєктування «фор-ескіз».

6. Особливістю розроблених CFD моделей є можливість проведення розрахунків в областях, що мають складну геометричну форму; для практичної реалізації побудованих моделей використовуються типові вхідні дані, що є

важливим при проведені комплексу досліджень, в яких розглядаються різні сценарії організації захисту повітря від пилового забруднення.

7. Результати верифікації розроблених CFD моделей підтвердили їх адекватність.

8. Результати комп’ютерних експериментів показують, що запропоновані CFD моделі являють собою сучасний інструмент проведення складних наукових досліджень в галузі охорони праці.

РОЗДІЛ 6
ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ НЕБЕЗПЕКИ НА ПРОМИСЛОВИХ МАЙДАНЧИКАХ ПРИ ЕКСТРЕМАЛЬНИХ СИТУАЦІЯХ

Екстремальні ситуації на території промислових об’єктів створюють загрозу життю робітників та мають значний негативний вплив на об’єкти, що розташовані на промислових майданчиках (нафтосховища, сховища вибухових речовин, АЕС тощо). При екстремальних ситуаціях на промислових майданчиках можлива поява різних уражальних чинників, наприклад, поява в повітрі токсичних речовин, створення вогняної кулі, поява ударної хвилі тощо. У випадку вибухів на промисловому майданчику має місце розліт уламків зі значною швидкістю, які створюють ризик ураження персоналу та об’єктів, а також утворення та рух ударної хвилі. Слід зазначити, що особливу увагу в даний час звертають задачі, що пов’язані з атакою дронів (розльотом уламків при вибухах дронів). Якщо є така екстремальна ситуація на промисловому майданчику, де розташовані сховища нафтопродуктів, то уламки, що утворилися внаслідок вибуху, можуть пошкодити корпус нафтосховища. Це призвиде до виливу продуктів, пожежі на промисловому майданчику, викиду в атмосферне повітря продуктів пожежі та появи теплового забруднення довкілля. Таким чином, дуже важливо розробляти засоби захисту нафтосховищ при розльоті уламків внаслідок вибуху дронів. Це дає підставу для проведення наукових досліджень з метою удосконалення систем захисту нафтосховищ на промислових майданчиках при вибухах дронів.

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

6.1 Чисельна модель розльоту уламків при вибухі дрону

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 [23]. Ставиться задача розробки чисельної моделі руху уламку, на шляху якого розташована захисна перешкода.

Уламки, що утворюються при вибуху дрона, мають різну геометричну форму, масу, швидкість руху.

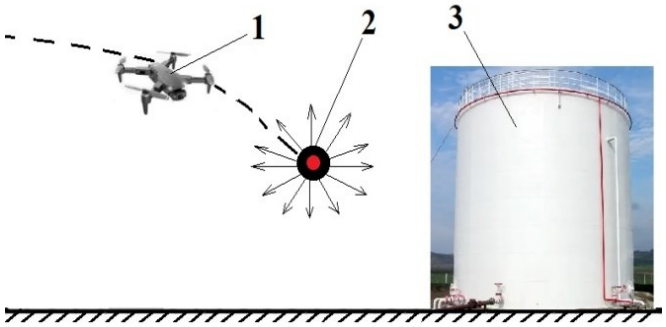


Рисунок 6.1 – Схема вибуху дрона біля нафтосховища:
1 – дрон; 2 – місце вибуху; 3- нафтосховище (об’єкт).

Крім цього ці уламки можуть утворюватися на різній висоті та рухатися під різним кутом до об’єкту, який потрібно захистити (далі – об’єкт). Для побудови математичної моделі руху уламку та взаємодії його з корпусом захисної перешкоди робимо такі припущення:

1) уламок має форму кулі; радіус R цієї приведеної кулі визначається знаючи об’єм уламка W;

2) маса уламка – відома;

3) швидкість та напрям руху уламку від точки вибуху – відомі;

4) відома довжина від місця розльоту уламків до перешкоди та об’єкту;

5) кут α вильоту уламку відносно поверхні землі – відомий;

6) відома щільність ρ_{cm} матеріалу 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).

Динаміка руху уламку в першій та третій зоні будемо описувати за допомогою другого закону Ньютона [23]:

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = -\vec{F}_R - \vec{F}_g, \tag{6.1}$$

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

Відзначимо, що якщо уламок має об’єм W, то радіус приведеної кулі визначається так:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3W}{4\pi}}.$$

Тоді, площа міделевого перерізу уламка буде:

$$S = \frac{\pi d^2}{4},$$

де $d = 2R$.

Для практичного використання рівняння (6.1) напишемо його в проекції на осі координат для кожної зони :

$$m\frac{du}{dt} = -C_x \frac{\rho_в u^2}{2} \cdot S \cdot u, \tag{6.2}$$

$$m\frac{dv}{dt} = -C_x \frac{\rho_в v^2}{2} \cdot S \cdot v - mg, \tag{6.3}$$

де *u, v* – проекції вектору швидкості руху уламку на осі координат. Відзначимо, що вісь *Y* направлена вертикально вгору, а вісь *X* – в напряму горизонтального руху уламка.

Далі здійснюється чисельне інтегрування рівнянь (6.2), (6.3) для визначення швидкості руху уламку в першій та третій зонах.

Розв'язання рівнянь (6.2), (6.3) для першої та третьої зон здійснюються чисельним шляхом за допомогою метода Ейлера. Визначення значень компонент швидкості руху уламку *u, v* на новому часовому шарі *«n+1»* здійснюється на базі таких залежностей:

$$u^{n+1} = u^n - \Delta t \cdot C_x \frac{\rho_в V^2}{2m} \cdot S \cdot u\,, \tag{6.4}$$

$$v^{n+1} = v^n - \Delta t \cdot C_x \frac{\rho_в V^2}{2m} \cdot S \cdot v - \Delta t \cdot g\,. \tag{6.5}$$

Для проведення розрахунку на базі залежностей (6.4) та (6.5) потрібно задати кут α вильоту уламку.

Дальність $x(t)$ відльоту уламку від місця вибуху визначається так :

$$x(t) = x_0 + u \cdot t\,,$$

де x_0 – координата місця відльоту уламка.

Розглянемо зараз зону № 2, де має місце взаємодія уламка з перешкодою. Розглянемо випадок коли перешкода – це металева пластина. Товщина перешкоди, при якій має місце повна втрата швидкості уламку, визначається на базі емпіричної моделі (К. Е. Кочетков, В.А. Котляревський, А.В. Забегаєв):

$$h_* = \frac{0.138 \cdot d_1 \cdot \rho_1 \cdot V}{\sqrt{\sigma_2 \cdot \rho_2}}\,, \tag{6.6}$$

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 (запереш кодна швидкість) визначається так (К. Е. Кочетков, В.А. Котляревський, А.В. Забегаєв):

$$V_\lambda = V \cdot \left(1 - \frac{h_2}{h_*}\right). \qquad (6.7)$$

Якщо буде така ситуація, то далі приймається, що з даною швидкістю уламок починає рухатися від захисної перешкоди в напряму нафтосховища.

Стосовно взаємодії уламку та стінки нафтосховища проведемо такі міркування. Нехай, в момент часу t_w^n, коли уламок «зустріне» стінку об'єкту, швидкість руху уламка дорівнює V_w. Далі приймаємо, що за певний проміжок часу dt, коли має місце взаємодія уламка та стінки об'єкта, швидкість уламка зменшиться до нуля. На ділянку стінки об'єкта, де є взаємодія з уламком, буде діяти сила F_w. Величина цієї сили залежить від зміни «кількості руху» уламка за проміжок часу dt. Це визначається згідно другого закону Ньютона так:

$$F_w dt = mdV$$

або

$$F_w = \frac{mdV}{dt}.$$

З урахуванням того, що кінцева швидкість уламку дорівнює нулю, маємо :

$$F_w = \frac{mV_w}{dt}. \qquad (6.8)$$

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

$$p_w = \frac{F_w}{S}. \qquad (6.9)$$

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

$$p_w \geq \sigma. \qquad (6.10)$$

Безумовно, розглянутий метод визначення тиску, при якому буде руйнування матеріалу стінки об'єкту, є наближеним. По-перше, площа «взаємодії» уламка та стінки об'єкту може бути значно менше S, так як уламок в дійсності має складну геометричну форму та гострі кути. По-друге, потрібно

коректно визначати проміжок часу *dt* (цей час залежить від ряду факторів, в першу чергу, властивості матеріалу стінки, уламку тощо).

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

Розроблені чисельні моделі були використані для рішення комплексу прикладних задач. Перша задача – визначення ефективності металевої перешкоди для захисту корпусу нафтосховища від дії уламків (рис. 6.1).

Розрахунок здійснено при таких даних: коефіцієнт опору уламку 0,47; висота викиду уламка 2 м, приведений діаметр уламка 0,02 м; $\sigma_2=4{,}7\cdot10^8$ Па; $\rho_1=7800$ кг/м^3 – щільність матеріалу уламку; $\rho_2=7800$ кг/м^3 – щільність матеріалу перешкоди.

Початкова швидкість V_0 стального уламка після вибуху та товщина перешкоди варіювалися. Рух уламку – горизонтальний від точки вибуху в напрямку захисної перешкоди та нафтосховища. Вибух відбувається на відстані 50м від нафтосховища, захисна перешкода (сталевий лист) розташована на відстані 10м від нафтосховища.

На рис. 6.2 показано величину швидкості V_2 уламка біля стінки нафтосховища, коли в якості захисної перешкоди був використаний стальний лист товщиною 1 мм.

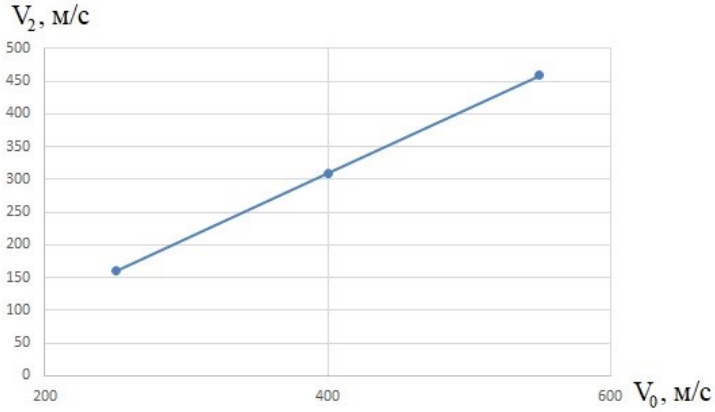


Рисунок 6.2 – Швидкість V_2 ,з якою уламок стикається зі стінкою нафтосховища в залежності від початкової швидкості V_0 уламка (при наявності захисної перешкоди).

Як видно з рис. 6.2, стальний лист вибраної товщини не забезпечує зупинку уламка, тобто уламок «проходить» дану захисну перешкоду та продовжує рухатися до нафтосховища. Швидкість уламка V_2 біля стінки нафтосховища дуже велика, що неминуче призведе до негативних наслідків.

На рис. 6.3 показано мінімальне значення товщини захисної перешкоди для різних значень початкової швидкості руху уламку та при його діаметрі 0,03 м.

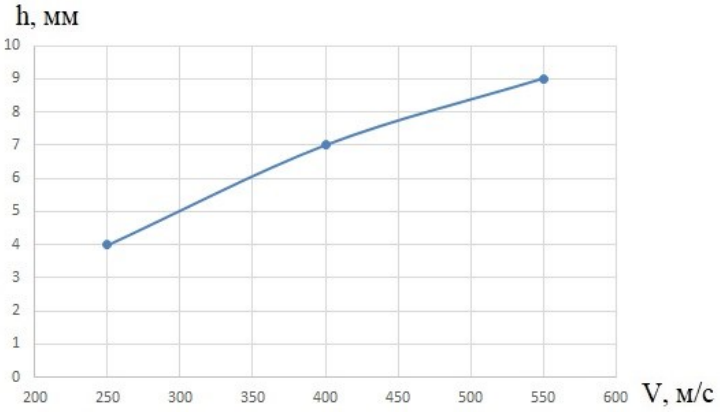


Рисунок 6.3 – Мінімальне значення товщини захисної перешкоди при різній швидкості уламку.

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.

Слід відзначити, що час розрахунку складає 0,5 с.

Далі розглядається задача розльоту уламків при вибуху дрона на промисловому майданчику, де розташовані габіони з різним наповненням біля нафтосховища (рис. 6.4).



Рисунок 6.4 – Приклад габіону (https://cutt.ly/Ge6IYzQ3).



Рисунок 6.5 – Приклад габіону Axial gabion (https://cutt.ly/me6IYClq).

Розрахункова схема задачі показана на рис. 6.6.

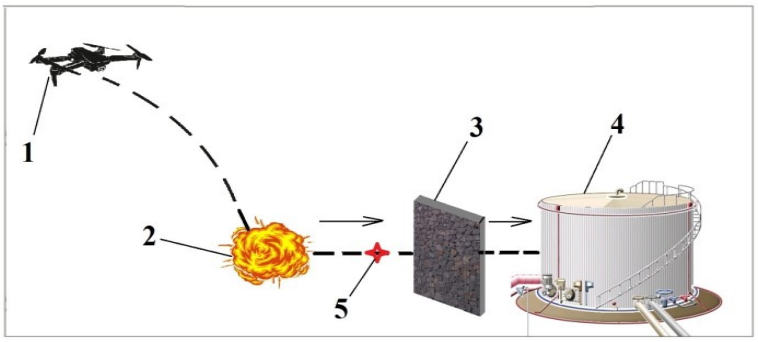


Рисунок 6.6 – Розташування габіону на промисловому майданчику:
1 – дрон; 2 – місце вибуху; 3 – габіон; 4 – нафтосховище; 5 – уламок.

Для побудови математичної моделі руху уламку та взаємодії його з корпусом захисної перешкоди (габіон) робимо такі припущення: уламок має форму конуса.

Коефіцієнт опору C_x для першої та третьої зони приймається 0,5, для другої зони приймається 0,85 (Герасімов С.І, Єрофєєв В. І та інші).

На базі побудованої чисельної моделі та створеного коду були проведені параметричні дослідження. Визначалася ефективність використання габіону для двох сценаріїв:

1й сценарій: тіло габіону – мокрий пісок, щільність ρ=1920 кг/м^3;

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

Розглядався випадок, коли уламок після вибуху рухається горизонтально в напрямку об’єкту (α=0). Розрахунок для першого варіанту виконано при таких даних: вибух відбувається на відстані 25 м від нафтосховища, захисна перешкода розташована на відстані 12 м від нафтосховища. Висота викиду уламка 2 м, маса уламка 0,03 кг та 0,07 кг. Початкова швидкість уламка варіюється. Результати обчислювального експерименту показані в табл. 6.1 та табл. 6.2.

Таблиця 6.1 – Значення заперешкодної швидкості уламка (маса уламка 0,03 кг)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b м/с	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 6.2 – Значення заперешкодної швидкості уламка (маса уламка 0,07 кг)

Початкова швидкість уламку	Заперешкодна швидкість V_b м/с	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. 6.1 та табл. 6.2 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.

Далі розглядаються результати обчислювального експерименту для сценарію, коли щільність наповнювача габіону була різна:

– тирса деревна ρ=400 кг/м^3;

– макуха ρ=590 кг/м^3;

– земля суха ρ=1100 кг/м^3.

Розрахунок виконувалася для маси уламка 0,02 кг. Початкова швидкість уламка варіюється. Результати розрахунку для даних параметрів показані в табл. 6.3-6.5.

Таблиця 6.3 – Значення заперешкодної швидкості уламка (наповнювач – тирса деревна)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b м/с	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 6.4 – Значення заперешкодної швидкості уламка (наповнювач – макуха)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b м/с	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 6.5 – Значення заперешкодної швидкості уламка (наповнювач – земля суха)

Початкова швидкість уламка	Заперешкодна швидкість V_b м/с	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. 6.3-6.5, 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.

Відзначимо, що час розрахунку складає 2 с.

Далі розглядається рішення іншої прикладної задачі. Розглядається вибух дрона та розліт уламків на промисловому майданчику. Розрахунок здійснюється при таких даних: вибух відбувається на відстані 40 метрів від нафтосховища, захисний бар'єр розташований на відстані 15 метрів від нафтосховища. Висота викиду уламку становить 3 м, маса уламку – 50 г. Розглянуто два сценарії. Перший сценарій: ρ=1600 кг/м^3 – густина піску в габіоні (сухий пісок); початкова швидкість фрагмента змінюється: 300 м/с; 450 м/с; 600 м/с. Густина матеріалу фрагмента становить 7700 кг/м^3, діаметр основи «конуса» фрагмента – 2 см. Вважається, що захисна функція габіону виконується, якщо швидкість за перешкодою для уламка (тобто швидкість за габіоном) становить близько 0,2 м/с, тобто при цій швидкості кінетична енергія уламка недостатня для пошкодження поверхні нафтосховища. Завдання полягає у визначенні необхідної ширини габіону. Результат моделювання показано в табл. 6.6.

Таблиця 6.6 – 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. 6.6, ефективним буде габіон, що має товщину порядку 2 м.

Другий сценарій: початкова швидкість фрагмента 700 м/с; щільність піску в габіоні змінюється: ρ=1600 кг/м^3 (сухий пісок); ρ=1920 кг/м^3 (мокрий пісок); ρ=2080 кг/м^3 (мокрий, стиснутий пісок).

Результати розрахунків для другого сценарію наведено в табл. 6.7.

Таблиця 6.7 – 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. 6.7, можна стверджувати, що при використанні вологого, стиснутого піску в тілі габіону його товщину можна зменшити приблизно на 20 %.

6.2 Моделювання теплового забруднення повітря на промислових майданчиках

Екстремальні ситуації на промислових об’єктах часто призводять до виникнення пожежі (рис. 6.7, 6.8) . Слід підкреслити, що пожежі – це типове явище при атаці дорнами нафтосховищ. При такому явищі в повітря потрапляє значна кількість хімічно-небезпечних речовин (продукти горіння палива) та з’являється ризик термічного ураження працівників.



Рисунок 6.7 – Пожежа на нафтосховищі (https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto).



Рисунок 6.8 – Пожежа на промисловому майданчику (https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto).

Внаслідок значної температури повітря при пожежі виникає ризик займання інших сховищ. Тому важливим напрямом наукових досліджень є розробка засобів для зменшення ризику термічного ураження працівників та об’єктів на промисловому майданчику. Для рішення цієї важливої задачі слід мати ефективні математичні моделі, щоб за короткий час визначити ефективність використання захисних засобів для конкретних умов експлуатації.

При проєктуванні захисних конструкцій потрібно заздалегідь визначати їх ефективність та час можливого руйнування. Це потребує розробки та використання спеціалізованих математичних моделей. Дана робота присвячена розробці чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати теплові поля на промисловому майданчику при пожежі, та оцінювати ризик руйнування захисної стінки (бар’єру).

При виникненні пожежі на промисловому майданчику для захисту об’єктів можуть використовуватися різного роду конструкції – стінки, габіони тощо. Тому виникає важлива задача оцінювання часу, коли захисна функція споруди зменшується та з’являється ризик її руйнування. Для рішення цієї важливої задачі потрібно мати спеціалізовані математичні моделі. Слід вказати, що дана задача потребує рішення двох зв’язаних «підзадач»:

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

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

Крім цього, перед вирішенням цих двох «підзадач» потрібно визначити поле швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику при наявності на ньому різного роду перешкод. Сумісне вирішення вказаних задач дуже ускладнює створювання математичних моделей для рішення задач даного класу.

Для математичного моделювання процесу теплового забруднення повітря на промисловому майданчику при пожежі застосовується наступне рівняння [13]:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial x}+\frac{\partial vT}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y\frac{\partial T}{\partial y}\right), \qquad (6.11)$$

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

Крайові мови:

1) початкова умова: $T_{t=0}=T_{A0}$, де T_{A0} – відома температура повітряного потоку на промисловому майданчику до початку пожежі;

2) на межі входу повітряного потоку в розрахункову область $T=T_{in}$, де T_{in} – відома температура повітряного потоку, який затікає в розрахункову область;

3) на межі виходу повітряного потоку з обтічника: $\left.\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}\right|_{CD}=0$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор зовнішньої нормалі до межи області;

4) на місце пожежі задається «внутрішня» гранична умова першого роду: $T=T_0$, де T_0 – відома температура.

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

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 P}{\partial y^2}=0, \tag{6.12}$$

де P – потенціал швидкості повітряного потоку.

Для розв'язку рівняння (6.17) задано відповідні граничні та початкові умови:

1) $\left.\frac{\partial P}{\partial \vec{n}}\right|_{AB}=U$ – умова Неймана, на межі, де потік входить в розрахункову область зі швидкістю U;

2) на межі виходу повітряного потоку з розрахункової області: $P=P_0+const$ – умова Діріхле, де P_0 – довільна константа;

3) на твердих поверхнях, захисному бар'єрі, верхньої межі розрахункової області реалізується умова: $\left.\frac{\partial P}{\partial \vec{n}}\right|_{surface}=0$, де $\vec{n}$ – одиничний вектор до поверхні.

Після визначення поля потенціалу швидкості визначаються компоненти вектора швидкості повітряного потоку на основі залежностей:

$$u=\frac{\partial P}{\partial x}, v=\frac{\partial P}{\partial y}. \tag{6.13}$$

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

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\left(a_x\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right), \tag{6.14}$$

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

Для рівняння (6.14) реалізуються наступні крайові умов (рис. 6.9):

1. На лівій межі (із зовнішньої сторони стінки) задається температура повітря на відкритій місцевості, що змінюється з часом:

$$T_A=T(t),$$

де t – час.

2. На лівій межі цієї стінки задається значення температури $T_A = f(t,h)$ – це температура атмосферного повітря за стінкою, що змінюється з часом t та змінюється по висоті бар'єру h. На правій межі захисної стінки використовується також поточне значення температури, що визначається при рішенні рівняння (6.14), тобто $T_B = f(t,h)$.

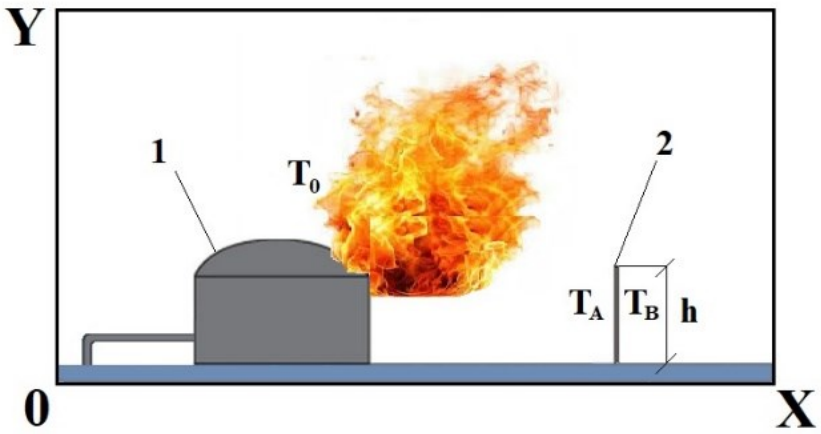


Рисунок 6.9 – Розрахункова схема: 1 – нафтосховище; 2 – захисний бар'єр.

Початкова умова – це значення температури всередині стінки T_A.

Таким чином, рішення рівняння (6.14) здійснюється при використанні граничної умови першого роду на обох межах, що змінюються з часом.

Таким чином, у цій роботі розв'язується дотична задача, а саме: виконується сумісний розв'язок рівнянь теплопереносу та теплопровідності при відповідних крайових умовах. Алгоритм рішення наступний:

1. Розв'язується «зовнішня» задача, тобто шляхом розв'язання моделюючого рівняння аеродинаміки визначається поле швидкості повітря в області дослідження.

2. Розв'язується «зовнішня» задача, тобто шляхом розв'язання моделюючого рівняння теплопереносу визначається поле температури на промисловому майданчику та навколо захисного бар'єру для конкретного моменту часу.

3. Починається розрахунок процесу прогрівання стінки з урахуванням вказаних крайових умов.

4. Далі, для нового розрахункового кроку за часом розраховується нове значення температури повітря на промисловому майданчику та навколо захисного бар'єру.

5. Знову здійснюється розрахунок прогрівання стінки для нового поля температури на промисловому майданчику.

Таким чином визначається нестаціонарне значення температури стінки. Далі, здійснюється порівняння температури всередині стінки з температурою, коли починається руйнування стінки T_{col}. Час досягнення цієї температури вказує на час початку руйнування захисної конструкції.

Для чисельного інтегрування рівняння Лапласа для потенціалу швидкості використовується явна схема. Рівняння Лапласа приводилося до «нестаціонарного» вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \tag{6.15}$$

де t – фіктивний час.

Далі використовувалася така апроксимація:

$$P_{i,j}^{n+1} = P_{i,j}^{n} + \triangle t \frac{P_{i+1,j}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j}^{n}}{\Delta x^2} + \triangle t \frac{P_{i,\mathrm{j}+1}^{n} - 2P_{i,j}^{n} + P_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Розрахунок за даною залежністю закінчується коли:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n} \right| \le \varepsilon,$$

де $P_{i,j}^{n+1}$ – значення потенціалу швидкості на новій ітерації; $P_{i,j}^{n}$ – значення потенціалу швидкості на попередній ітерації; ε – мале число.

Значення компонент швидкості розраховуємо на сторонах комірок так:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Для чисельного інтегрування рівняння теплопереносу здійснюється наступна апроксимація похідних [13, 41]:

$$\frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial u^{+}T}{\partial x} + \frac{\partial u^{-}T}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial v^{+}T}{\partial y} + \frac{\partial v^{-}T}{\partial y};$$

$$u^{+} = \frac{u+|u|}{2}, u^{-} = \frac{u-|u|}{2}, v^{+} = \frac{v+|v|}{2}, v^{-} = \frac{v-|v|}{2};$$

$$\frac{\partial u^{+}T}{\partial x} \approx \frac{u^{+}_{i+1,j}T^{n+1}_{i,j} - u^{+}_{i,j}T^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x} = L^{+}_{x}T^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^{-}T}{\partial x} \approx \frac{u^{-}_{i+1,j}T^{n+1}_{i+1,j} - u^{-}_{i,j}T^{n+1}_{i,j}}{\Delta x} = L^{-}_{x}T^{n+1};$$

$$\frac{\partial \nu^{+}T}{\partial y} \approx \frac{\nu^{+}_{i,j+1}T^{n+1}{}_{i,j} - \nu^{+}_{i,j}T^{n+1}{}_{i,j-1}}{\Delta y} = L^{+}_{y}T^{n+1};$$

$$\frac{\partial \nu^{-}T}{\partial y} \approx \frac{\nu^{-}_{i,j+1}T^{n+1}{}_{i,j+1} - \nu^{-}_{i,j}T^{n+1}{}_{i,j}}{\Delta y} = L^{-}_{y}T^{n+1};$$

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(a_x \frac{\partial T}{\partial x}\right) \approx a_x \frac{T^{n+1}_{i+1,j} - T^{n+1}_{i,j}}{\Delta x^2} - a_x \frac{T^{n+1}_{i,j} - T^{n+1}_{i-1,j}}{\Delta x^2} = M^{-}_{xx}T^{n+1} + M^{+}_{xx}T^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y}\left(a_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) \approx a_y \frac{T^{n+1}_{i,j+1} - T^{n+1}_{i,j}}{\Delta y^2} - a_y \frac{T^{n+1}_{i,j} - T^{n+1}_{i,j-1}}{\Delta y^2} = M^{-}_{yy}T^{n+1} + M^{+}_{yy}T^{n+1}.$$

З урахуванням цих залежностей, апроксимація рівняння теплопереносу приймає вигляд:

$$\frac{T^{n+1}_{ij} - T^{n}_{ij}}{\Delta t} + L^{+}_{x}T^{n+1} + L^{-}_{x}T^{n+1} + L^{+}_{y}T^{n+1} + L^{-}_{y}T^{n+1} = \\ = (M^{+}_{xx}T^{n+1} + L^{-}_{xx}T^{n+1} + L^{+}_{yy}T^{n+1} + L^{-}_{yy}T^{n+1}). \qquad (6.16)$$

Далі має місце розщеплення (6.16) на чотири кроки:

– на першому кроці (k=1/4):

$$\frac{T^{n+k}_{i,j} - T^{n}_{i,j}}{\Delta t} + \frac{1}{2}\left(L^{+}_{x}T^{n+k} + L^{+}_{y}T^{n+k}\right) = \\ = \frac{1}{4}\left(M^{+}_{xx}T^{n+k} + M^{-}_{xx}T^{n} + M^{+}_{yy}T^{n+k} + M^{-}_{yy}T^{n}\right); \qquad (6.17)$$

– на другому кроці (k=n+1/2; c=n+1/4):

$$\frac{T_{ij}^{k}-T_{ij}^{c}}{\Delta t}+\frac{1}{2}\left(L_{x}^{-}T^{k}+L_{y}^{-}T^{k}\right)= \\ =\frac{1}{4}(M_{xx}^{-}T^{k}+M_{xx}^{+}T^{c}+M_{yy}^{-}T^{k}+M_{yy}^{+}T^{c}); \tag{6.18}$$

– на третьому кроці (k=n+3/4; c=n+1/2) використовується залежність (6.18);

– на четвертому кроці (k=n+1; c=n+3/4) використовується залежність (6.17).

Для чисельного інтегрування моделюючого одновимірного рівняння теплопровідності використовується явна різницева схема:

$$T_{i}^{n+1}=T_{i}^{n}+\Delta t\cdot a_{1}\frac{T_{i+1}^{n}-T_{i}^{n}}{\Delta x^{2}}+\Delta t\cdot a_{2}\frac{-T_{i}^{n}+T_{i-1}^{n}}{\Delta x^{2}}.$$

При використанні неоднорідного матеріалу стінки, коефіцієнти температуропровідності визначаються так (якщо, наприклад, матеріал має два шари різної температуропровідності):

$$a_{1}=\frac{2(a_{i+1}\cdot a_{i})}{a_{i+1}+a_{i}},a_{2}=\frac{2(a_{i-1}\cdot a_{i})}{a_{i-1}+a_{i}},$$

де a_1, a_2 – коефіцієнти температуропровідності для різних шарів матеріалу стінки.

Для чисельного інтегрування рівняння теплопереносу була також побудована друга чисельна модель Виконувалось наступне розщеплення рівняння теплопереносу:

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\frac{\partial uT}{\partial t}+\frac{\partial vT}{\partial t}=0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(a_{x}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(a_{y}\frac{\partial T}{\partial y}\right).$$

Схема розщеплення для рівняння конвективного переносу тепла записується так:

– на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{T_{i,j}^{k}-T_{i,j}^{n}}{\Delta t}+L_{x}^{+}T^{k}+L_{y}^{+}T^{k}=0;$$

– на другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^{k}}{\Delta t} + L_x^- T^{n+1} + L_y^- T^{n+1} = 0.$$

Невідоме значення T у кожному рівнянні визначається за формулою «рухомого рахунку».

Далі, для чисельного інтегрування другого рівняння з системи розщеплення використовувалася явна схема:

$$T_{i,j}^{n+1} = T_{i,j}^{n} + \Delta t a_x \frac{T_{i+1,j}^{n} - 2T_{i,j}^{n} + T_{i-1,j}^{n}}{\Delta x^2} + \Delta t a_y \frac{T_{i,j+1}^{n} - 2T_{i,j}^{n} + T_{i,j-1}^{n}}{\Delta y^2}.$$

Особливістю розглянутих схем чисельного інтегрування рівнянь є те, що на кожному розрахунковому кроці, температура визначається за явною формулою. Це дає змогу розробити ефективну компьютерну програму визначення динаміки зміни температури на промисловому майданчику, що має об’єкти, тобто складну геометричну форму.

При проведені обчислювального експерименту приймається, що коефіцієнти температуропровідності дорівнюють:

$$a_x = 0{,}1 \cdot u, a_y = 0{,}1 \cdot v.$$

На базі розробленої чисельної моделі створено комп’ютерний код, мова програмування – FORTRAN.

Склад комп’ютерного коду:

– Q19T.DAT – файл даних для розрахунку 2D температурного поля на промисловому майданчику;

– Q19T1 – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE», явна різницева схема);

– Q19E1 – розрахунок 2D поля температурного поля (підпрограма типу «SUBROUTINE», кінцево-різницева схема розщеплення);

– Q19M1 – розрахунок 2D поля температурного поля (підпрограма типу «SUBROUTINE», явна кінцево-різницева схема);

– Q19T2 – розрахунок 2D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q19T3 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q19T4 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі теплопереносу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»).

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Формування блоку початкових даних (місце розташування бар'єру, геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т.д.).

2. Рішення 2D чисельної моделі аеродинаміки.

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів та визначення нерівномірного поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику.

4. Рішення 2D чисельної моделі теплопереносу.

5. Виведення «на друк» поля температури повітря на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні такі дані:

1) геометрична форма захисного бар'єру;

2) розміри захисного бар'єру;

3) місце розташування об'єкту, що потрібно захистити від теплового навантаження;

4) початкова температура в області дослідження;

5) швидкість набігаючого повітряного потоку;

6) коефіцієнти температуропровідності;

7) крок за часом;

8) розміри 2D розрахункової сітки;

9) розміри 2D розрахункової області.

Особливості розробленої 2D CFD моделі:

1. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку на промисловому майданчику для довільної кількості захисних бар'єрів та об'єктів, що потрібно захистити від теплового навантаження.

2. Можливість рішення багатофакторних задач теплопереносу протягом 1-3 с.

3. CFD модель враховує різні метеоумови.

4. CFD модель дає можливість визначити вплив вдуву повітря (повітряна завіса) на зниження температури біля стінки об’єкту , що потрібно захистити.

Нижче наведено результати рішення модельних задач на базі розроблених чисельних моделей. Мета розрахунків – показати стійкість розроблених чисельних моделей при рішенні задач аеродинаміки та теплопереносу в областях складної геометричної форми.

Перша задача – розглядається пожежа на промисловому майданчику. На певній відстані від нафтосховища розташовується захисний бар’єр (рис. 6.10) (матеріал бар’єру – сталь). Ставиться задача – визначити динаміку формування області теплового забруднення на промисловому майданчику при виникненні пожежі та розрахунок температури всередині захисного бар’єру.

При проведенні обчислювального експерименту швидкість вітру приймалася 7 м/с, температура на місці пожежі 1300 °С, висота захисного бар’єру 4 м, товщина 2 см, матеріал – сталь. Початкова температура всередині захисного бар’єру 20 °С. Температура атмосферного повітря на промисловому майданчику дорівнює 20 °С.

Далі на рисунках показано динаміку формування температурних полів на промисловому майданчику для різних моментів часу після початку пожежі.

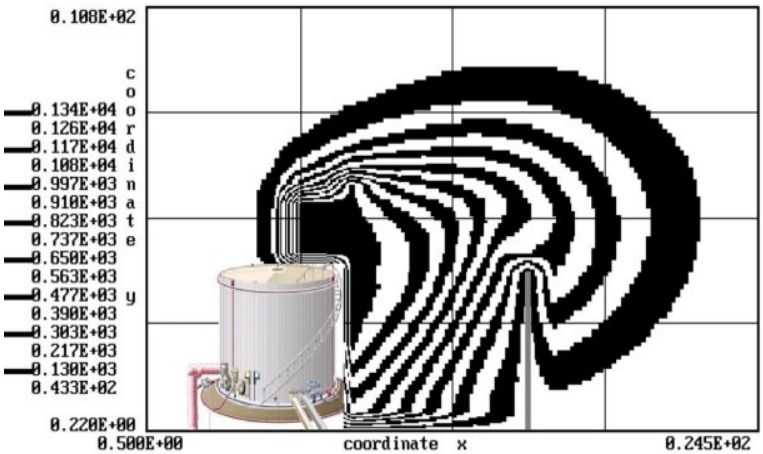


Рисунок 6.10 – Ізотерми, t=1,2 с.

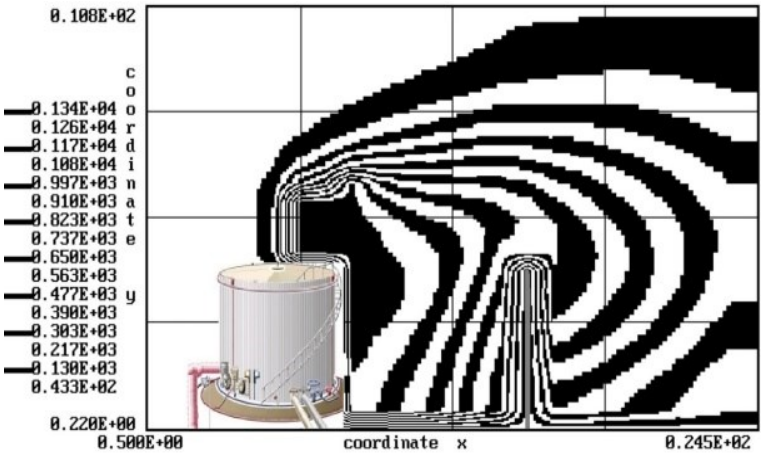


Рисунок 6.11 – Ізотерми, t=1,9 с.

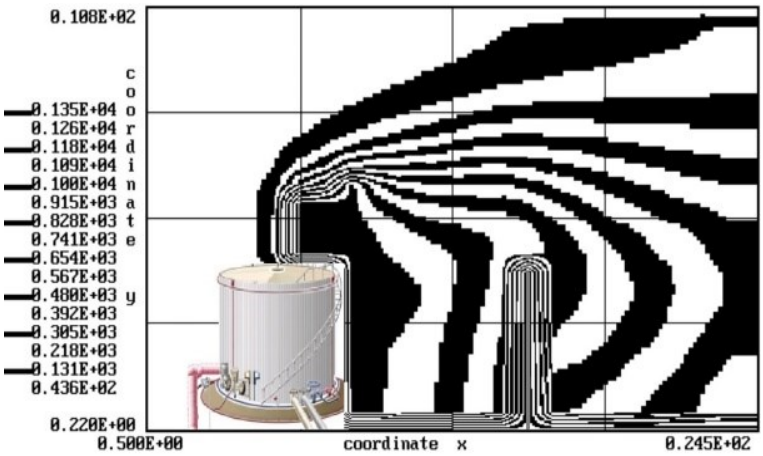


Рисунок 6.12 – Ізотерми, t=2,6 с.

Як можна бачити з наведених рисунків – на промисловому майданчику дуже швидко формується значна за розмірами область інтенсивного теплового забруднення, що створює ризик ураження працівників. Наявність захисного бар'єру на промисловому майданчику призводить до суттєвої деформації цієї області. Дані математичного моделювання показують, що для моменту часу t=2,8с температура повітря на навітряному боці захисного бар'єру змінюється від T_A=962 °С, в нижній частині бар'єру, до T_A=1027 °С – у верхній частині бар'єру. З іншого боку бар'єру, підвітряного, температура змінюється від T_B=728 °С – в нижній частині бар'єру до температури T_B=963 °С у верхній частині бар'єру.

Далі, на рис. 6.13 показано розподіл температури всередині захисного бар'єру для двох моментів часу: t=3,02 с, t=3,78 с. Розглядається переріз бар'єру на висоті 2 м. Точці «0» відповідає навітряний бік захисного бар'єру.

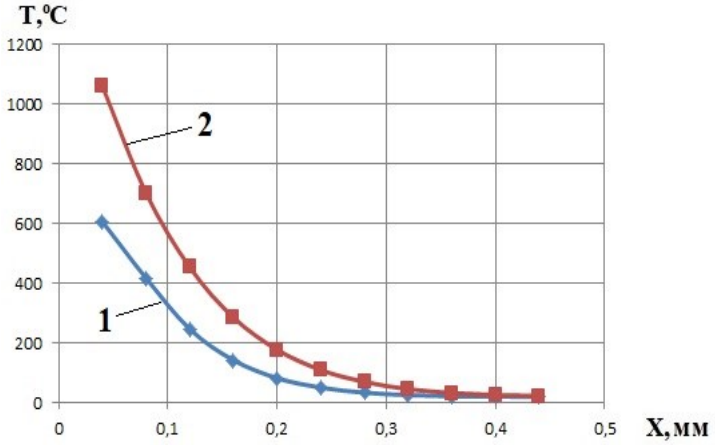


Рисунок 6.13 – Розподіл температури всередині захисного бар'єру:
1 – t=3,02 с; 2 – t=3,78 с.

Як можна бачити з рис. 6.13, температура всередині бар'єру для вказаних моментів часу не досягає критичного значення, необхідного для руйнування конструкції від термічної дії.

Відзначимо, що час розрахунку був 3 с.

Друга 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 далі на рисунках.

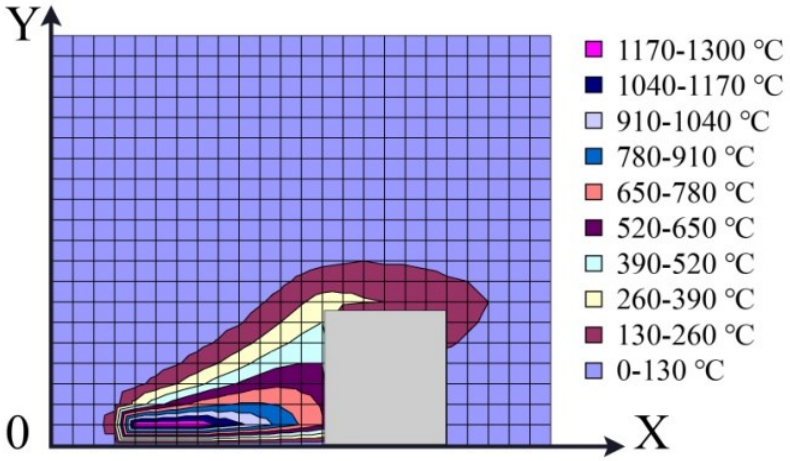


Рисунок 6.14 – Зона теплового забруднення (Сценарій №1).

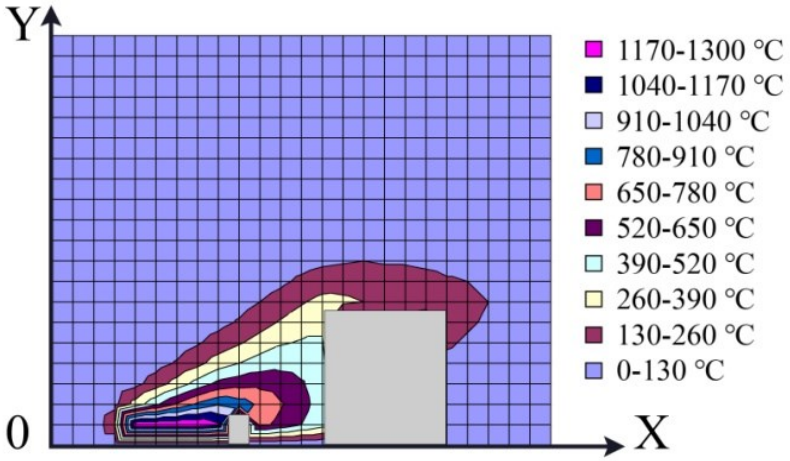


Рисунок 6.15 – Зона теплового забруднення (Сценарій №2).

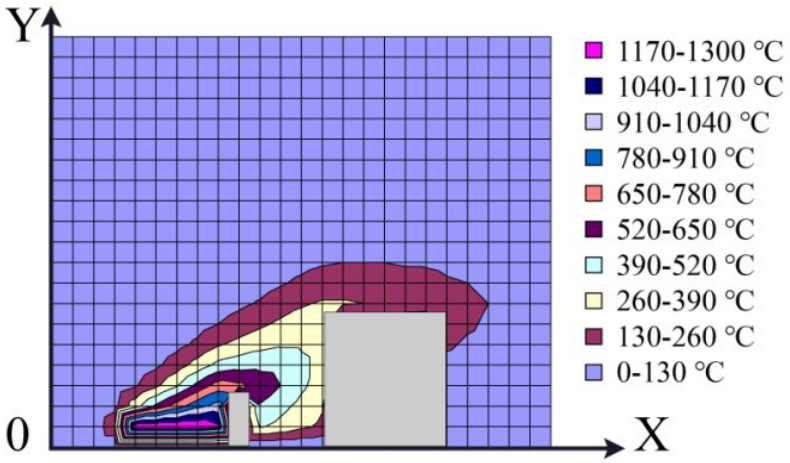


Рисунок 6.16 – Зона теплового забруднення (Сценарій №3).

З наведених вище рисунків видно, що температура повітря на навітряній стіні сховища, за відсутності екрану, змінюється від 663 °С (у нижній частині) до

390 °С (у верхній частині). За наявності екрану висотою 4 м температура змінюється від 442 °С (у нижній частині) до 364 °С (у верхній частині). За наявності екрану висотою 8 м температура змінюється від 234 °С (у нижній частині) до 325 °С (у верхній частині). Таким чином, екран ефективно знижує температуру в нижній частині стінки сховища за розглянутих сценаріїв.

Далі наведено результати рішення іншої задачі. На промисловому майданчику розташовані два нафтосховища. Між сховищами є насип (сценарій №1, рис. 6.17), а на насипі розташований захисний бар'єр (сценарій №2, рис.6.18).

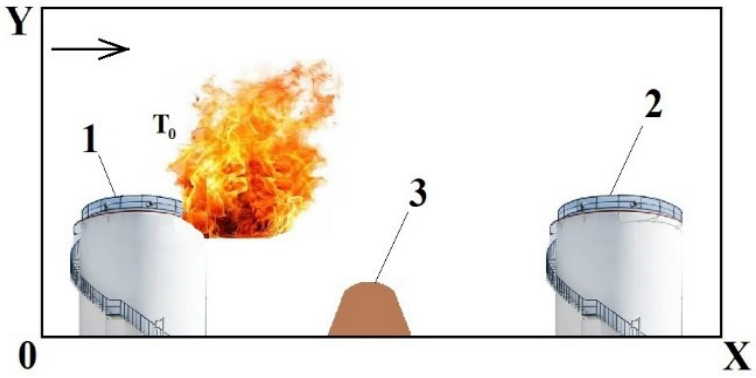


Рисунок 6.17 – Схема розрахункової області (сценарій № 1):
1 – нафтосховище, резервуар №1; 2 – нафтосховище, резервуар № 2;
3 – насип.

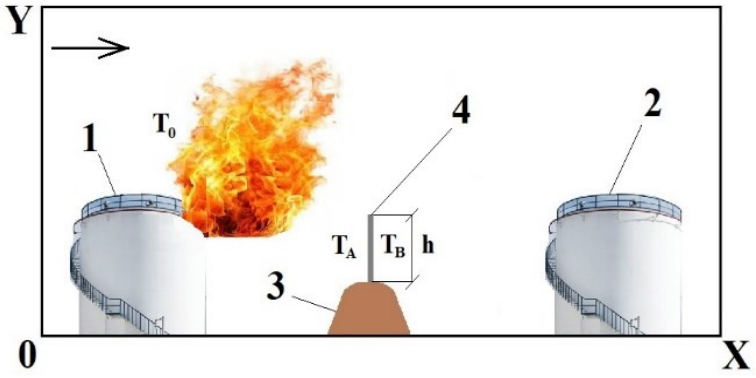


Рисунок 6.18 – Схема розрахункової області (сценарій № 2):
1 – нафтосховище, резервуар №1; 2 – нафтосховище, резервуар № 2;
3 – насип; 4 – захисний бар’єр.

Захисний бар'єр розташований на певній відстані від резервуара для зберігання нафти (рис. 6.18) на пагорбі. Метою було визначити температуру

повітря на промисловому майданчику та температуру всередині захисного бар'єру. Під час проведення обчислювального експерименту швидкість вітру була прийнята рівною 6 м/с, температура на місці пожежі 1300 °С, висота захисного бар'єру 3 м, товщина бар'єру 4 см, бар'єр був виготовлений зі сталі. Початкова температура всередині захисного бар'єру 20 °С. Температура атмосферного повітря на промисловому майданчику становить 20 °С. На рисунках нижче показано температурні поля на промисловому майданчику для різних сценаріїв.

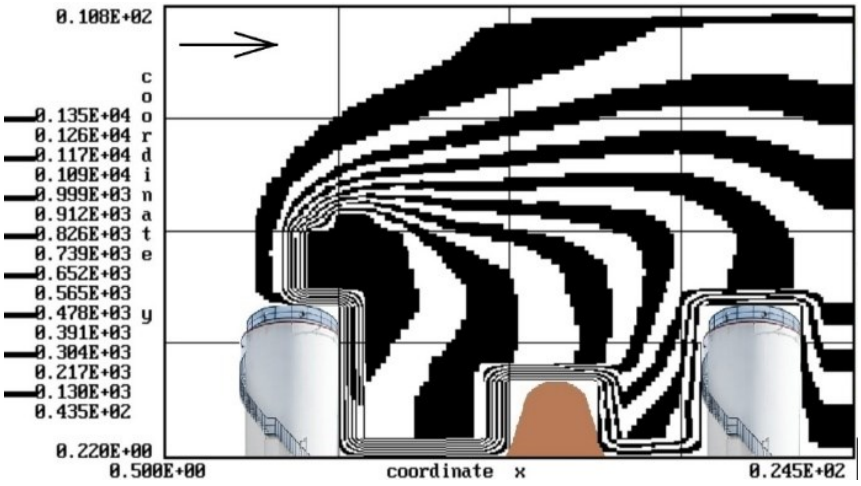


Рисунок 6.19 – Ізотерми, *t*=2,8 с (сценарій №1).

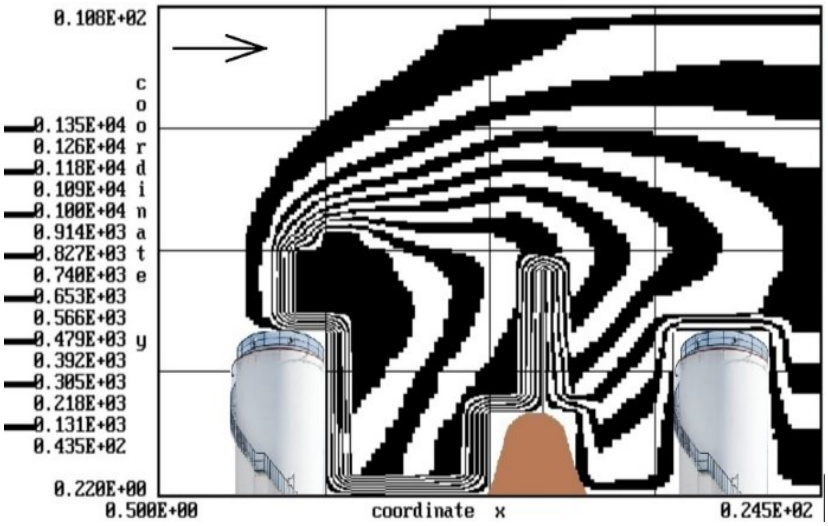


Рисунок 6.20 – Ізотерми, *t*=2,8 с (сценарій № 2).

Як видно з рис. 6.19 та рис. 6.20, на промисловому майданчику дуже швидко утворюється велика зона інтенсивного теплового забруднення, що створює ризик травмування працівників. Наявність захисного бар'єру на промисловому

майданчику призводить до значної деформації цієї зони. Математичне моделювання показало, що для сценарію №1, у момент часу t=2,8 с, температура повітря на навітряній стінці другого нафтосховища становить 338 °С у нижній частині сховища, а у верхній частині сховища температура становить 637 °С. Для сценарію №2 температура повітря на навітряній стінці другого нафтосховища становить 130 °С у нижній частині сховища, а у верхній частині сховища температура становить 429 °С. Це означає, що захисний бар'єр дозволяє знизити температуру поблизу другого нафтосховища.

Далі, на рис. 6.21 показано розподіл температури всередині захисного бар'єру в момент часу t=3,6 с. Поперечний переріз бар'єру взято на висоті 1,5 м. Точка «0» відповідає навітряній стороні захисного бар'єру.

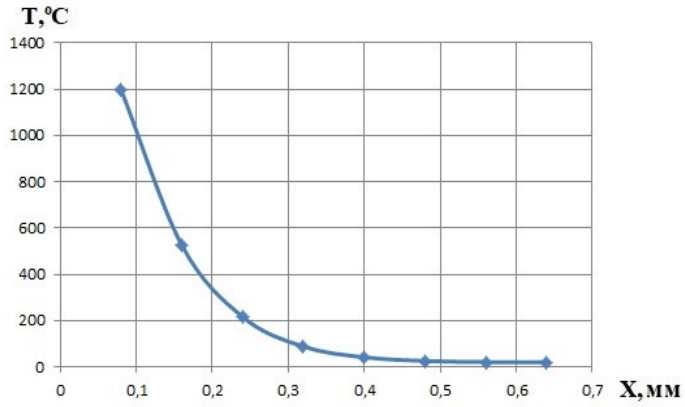


Рисунок 6.21 – Розподіл температури в захисному бар’єрі.

Як видно з рис. 6.21, температура всередині бар'єру за зазначений час не досягає критичного значення, необхідного для руйнування конструкції від теплового впливу.

6.3 Моделювання захисту резервуара з нафтою від теплової хвилі

Пожежі на території резервуарних парків, де знаходяться сховища нафтопродукті, викликають появу різних уражальних чинників: викид токсичних речовин в повітря, термічне ураження об’єктів на промисловому

майданчику, вибух та розліт уламків. Особливо актуальною проблемою є захист стінок резервуарів з нафтопродуктами від теплового впливу, коли має місце займання нафтопродуктів в сусідньому резервуарі (рис. 6.22). Слід відзначити, що комплексне вивчення даної проблеми, розробка моделей для рішення задач даного класу проводиться протягом тривалого часу в Національному університеті цивільного захисту України під керівництвом проф. Басманова О. Є.



Рисунок 6.22 – Пожежа на нафтосховищі (https://www.volynpost.com/news/51948-masshtabna-pozhezha-na-naftobazi-pid-vasylkovym-foto).

Нижче розглядається побудова експрес-моделі для рішення наступної задачі – «пілотного» оцінювання ефективності захисту стінок резервуару від теплового навантаження при виникненні пожежі на промисловому майданчику. При побудові математичної моделі обтікання сховища нагрітим потоком повітря не буде враховуватися процес передачі тепла випромінюванням, що має місце при пожежі; буде враховуватися конвекція та теплоперенос в повітрі. Модель орієнтована на експрес оцінювання ефективності захисту стінок сховища від нагріву на етапі проєктних робіт «фор-ескіз».

Для моделювання процесу нагріву повітря на промисловому майданчику використовується рівняння енергії [13]:

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

де T – температура повітря, °С; a_x, a_y – коефіцієнти температуропровідності, м^2/с; u, v – компоненти вектору швидкості повітря, м/с; (x_i, y_i) – Декартові координати, м; t – час, с.

Граничні умови для рівняння енергії наступні:

1) на вході в розрахункову область: $T|_{AB}=T_{entrance}$, де $T_{entrance}$ – відома температура нагрітого повітря, що рухається в напряму резервуару;

2) на межі виходу потоку з розрахункової області: $\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}=0,$ де $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі до межі;

3) на твердих поверхнях: $\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}=0,$ де $\vec{n}$ – одиничний вектор нормалі до межі;

4) на нижній та верхній межі: $\frac{\partial T}{\partial \vec{n}}=0.$

Початкова умова: $T_{t=0}=T_0$, де T_0 – відома температура повітря до началу пожежі (для моменту часу t=0).

Для чисельного інтегрування рівняння енергії використовуется різніцева схема розщеплення, що розглянута у попередньому розділі.

При проведенні розрахунків приймається:

$$a_x = 0{,}1 \cdot u(x,y),\ a_y = 0{,}1 \cdot v(x,y).$$

Для розрахунку поля швидкості повітряного потоку використовується модель нев'язкої безвихрової течії [41]:

$$\frac{\partial P^2}{\partial x^2}+\frac{\partial P^2}{\partial y^2}=0,$$

де P – потенціал швидкості.

Граничні умови для рівняння Лапласа розглядалися вище.

Якщо поле потенціалу швидкості відоме, то компоненти вектору швидкості повітряного потоку визначаються так:

$$u=\frac{\partial P}{\partial x}, v=\frac{\partial P}{\partial y}.$$

Чисельне інтегрування рівняння для потенціалу швидкості здійснюється на

прямокутній різницевій сітці.

Попередньо рівняння Лапласа приводиться до вигляду

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2},$$

де t – фіктивний час.

Далі використовується двокрокова схема розщеплення (сумарної апроксимації). Дана схема має вигляд:

– перший крок:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^{n}}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2}\right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2}\right];$$

– другий крок:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2}\right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2}\right].$$

Таким чином, для визначення поля функції P (потенціал швидкості) потрібно в кожній різницевій комірці (контрольному елементі) послідовно вирішувати рівняння розщеплення. Процедура цього рішення закінчується коли виконується умова:

$$\left|P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n}\right| \le \varepsilon,$$

де ε – мале число (приймається, ε=0,001); n – номер ітерації.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектору швидкості повітряного потоку на базі наступних залежностей

$$u = \frac{P_{i+1,j} - P_{i,j}}{\Delta x}, v = \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j}}{\Delta y}.$$

Виконано програмну реалізацію розглянутої чисельної моделі в середовищі FORTRAN.

Склад комп’ютерного коду:

– Q019.DAT – файл даних для розрахунку 2D температурного поля на промисловому майданчику де розташоване нафтосховище;

– Q019T – розрахунок 2D поля потенціалу швидкості (підпрограма типу «SUBROUTINE», явна різницева схема);

— Q19E*1* – розрахунок 2D поля температурного поля (підпрограма типу «SUBROUTINE», кінцево-різницева схема розщеплення);

– Q09T*2* – розрахунок 2D поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q09T3 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі аеродинаміки (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

– Q09T4 – побудова граничних умов для 2D області складної геометричної форми при рішенні задачі теплопереносу на промисловому майданчику (підпрограма типу «SUBROUTINE»);

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Формування блоку початкових даних (місце розташування нафтосховища, геометрична форма захисного бар'єру, розміри захисного бар'єру і т. д.).

2. Рішення 2D чисельної моделі аеродинаміки.

3. Розрахунок компонент вектора швидкості повітряного потоку на сторонах контрольних елементів та визначення нерівномірного поля швидкості повітряного потоку на промисловому майданчику.

4. Рішення 2D чисельної моделі теплопереносу;

5. Виведення «на друк» поля температури повітря на промисловому майданчику.

Для проведення комп'ютерного експерименту потрібні такі дані:

1) геометрична форма захисного бар'єру, нафтосховища;

2) розміри нафтосховища, захисного бар'єру, місця «вторинного» вдуву повітря;

3) місце розташування об'єкту, що потрібно захистити від теплового навантаження;

4) початкова температура в області дослідження;

5) швидкість набігаючого повітряного потоку;

6) коефіцієнти температуропровідності;

7) крок за часом;

8) розміри 2D розрахункової сітки;

9) розміри 2D розрахункової області.

Особливості розробленої 2D CFD моделі:

1. Можливість рішення 2D задач аеродинаміки повітряного потоку на промисловому майданчику для довільної кількості захисних бар'єрів та об'єктів, що потрібно захистити від теплового навантаження.

2. Можливість рішення багатофакторних задач теплопереносу протягом 4-7 с.

3. CFD модель враховує різні метеоумови.

4. CFD модель дає можливість визначити вплив вдуву повітря (повітряна завіса) на зниження температури біля стінки об'єкту, що потрібно захистити.

Нижче наведені результати рішення модельної задачі. Розглядається рух нагрітого повітря на ділянці промислового майданчика, де розташоване нафтосховище (резервуар), рис. 6.23. Метою проведення обчислювального експерименту є експрес оцінювання ефективності різних інженерних рішень по захисту від нагріву корпусу резервуара.



Рисунок 6.23 – Схема формування теплової хвилі на промисловому майданчику.

Розглядаються такі сценарій проведення комп'ютерного експерименту:

- Сценарій № 1: відсутній захист на промисловому майданчику;

- Сценарій № 2: наявний захисний бар’єр біля нафтосховища;

- Сценарій № 3: наявний захисний бар’єр біля нафтосховища + вдув повітря (швидкість 15 м/с) з температурою 5 ℃;

- Сценарій № 4: наявний захисний бар’єр біля нафтосховища + вдув повітря (швидкість 15 м/с) з температурою 5 ℃ + екран над нафтосховищем.

Схеми розрахункової області для кожного сценарію та поле температури на промисловому майданчику показані нижче на рисунках. Відзначимо, що маркеру «99» на рисунках, де показано поле температури, відповідає температурі 1200 ℃ в теплової хвилі, що рухається в напряму нафтосховища. Швидкість повітряного потоку 8 м/с.

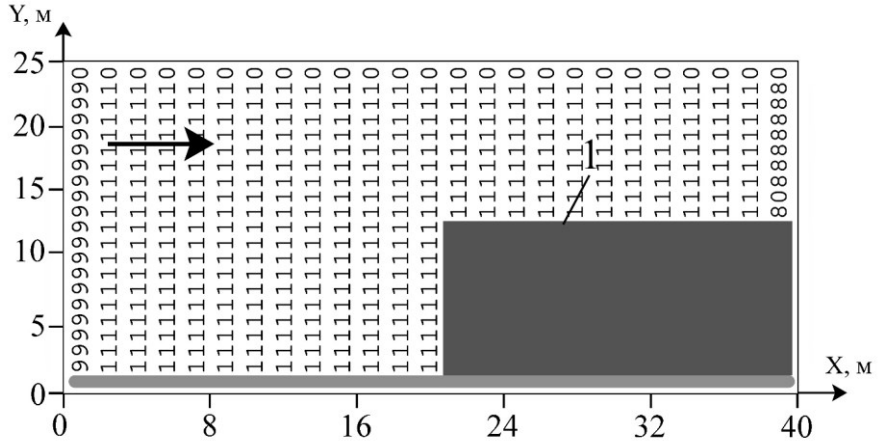


Рисунок 6.24 – Схема розрахункової області, сценарій № 1 – відсутня система захисту нафтосховища.

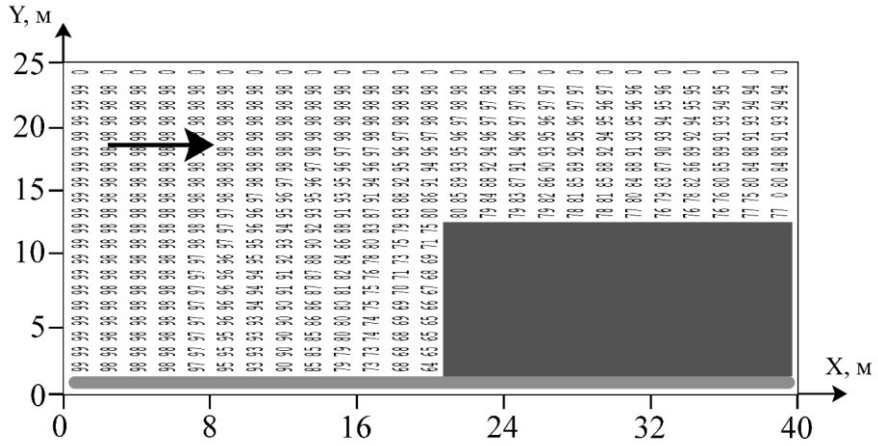


Рисунок 6.25 – Поле температури, *t*=18 с, сценарій № 1 – відсутня система захисту нафтосховища.

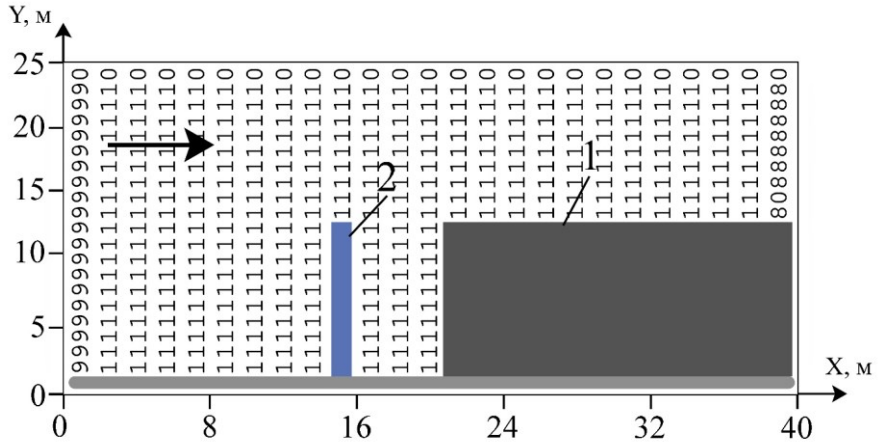


Рисунок 6.26 – Схема розрахункової області, сценарій № 2 – наявний захисний бар’єр (2) біля нафтосховища (1).

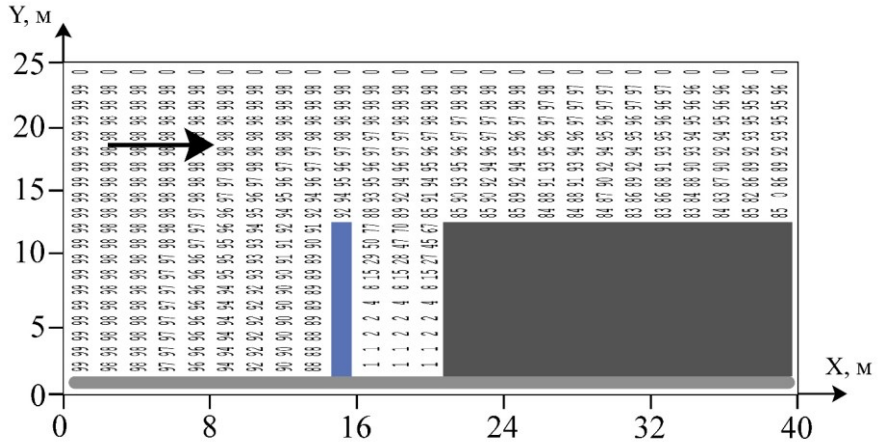


Рисунок 6.27 – Поле температури, *t*=18 с, сценарій № 2 – наявний захисний бар’єр біля нафтосховища.

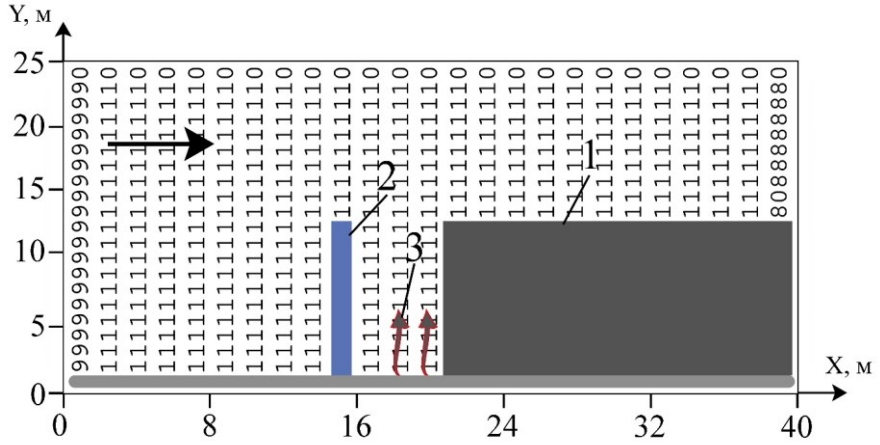


Рисунок 6.28 – Схема розрахункової області, сценарій № 3 – наявний захисний бар’єр (2) та вдув (3) біля стінки нафтосховища (1).

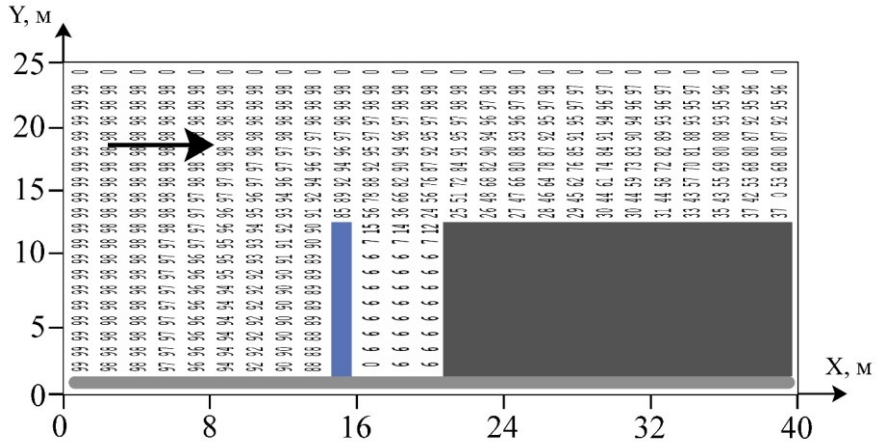


Рисунок 6.29 – Поле температури, *t*=18 с, сценарій № 3 – наявний захисний бар’єр та вдув біля стінки нафтосховища.

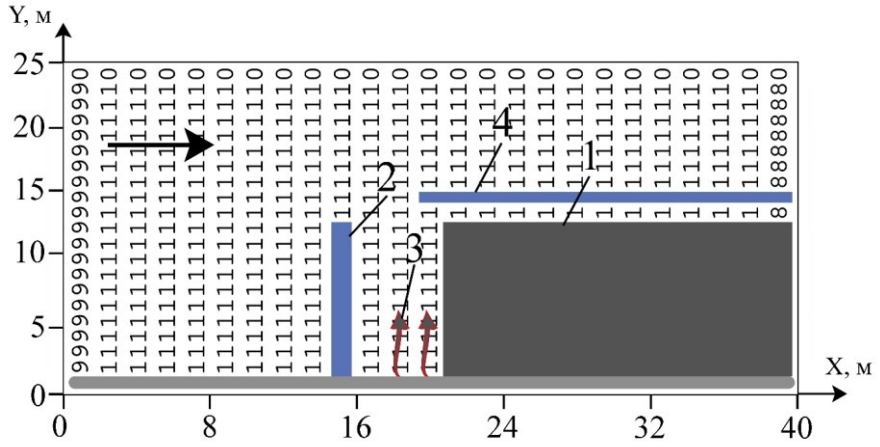


Рисунок 6.30 – Схема розрахункової області, сценарій № 4 – наявний захисний бар’єр (2) та вдув (3) біля стінки нафтосховища (1)та захисний екран (4) над нафтосховищем.

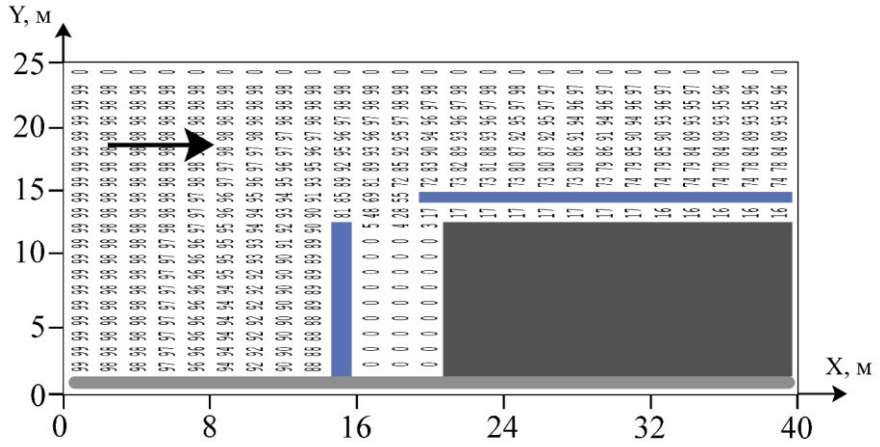


Рисунок 6.31 – Поле температури, *t*=18 с, сценарій № 4 – наявний захисний бар’єр та вдув біля стінки нафтосховища та захисний екран над нафтосховищем.

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 °С), 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 °С), над його верхньою частиною знаходиться в діапазоні 17 %.

6.4 Моделювання процесу дифракції ударної хвилі після вибуху

До області актуальних прикладних проблем відносяться нестаціонарні задачі руху ударної хвилі після вибуху на різних об’єктах. Рух ударної хвилі – це надзвукова течія повітря. Чисельне моделювання такого нестаціонарного процесу відноситься до дуже складних задач аеродинаміки.

Нижче розглядається побудова CFD моделі для розрахунку процесу дифракції ударної хвилі після вибуху на залізничній станції (рис. 6.33). У фізичній постановці задачі моделюється процес дифракції ударної хвилі на двох залізничних составах, що розташовані на залізничній станції.



Рисунок 6.32 – Схема розрахункової області: 1 – фронт ударної хвилі.

Для моделювання дифракції ударної хвилі на двох об'єктах ми використовували рівняння Ейлера, які були записані у вигляді інтегральних законів збереження. Ці рівняння були записані для неортогональної різницевої комірки (В.К. Хрущ, М.М. Біляєв):

$$\frac{\partial}{\partial t}\oint\limits_{\Delta G}\rho d\tau+\oint\limits_{\Delta\Gamma}\rho V_n ds=0 \tag{6.19}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\oint\limits_{\Delta G}\rho\vec{V}d\tau+\oint\limits_{\Delta\Gamma}\rho\vec{V}V_n ds+\oint\limits_{\Delta\Gamma}P\vec{n}ds=0 \tag{6.20}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\oint\limits_{\Delta G}\rho E d\tau+\oint\limits_{\Delta\Gamma}\rho I V_n ds=0 \tag{6.21}$$

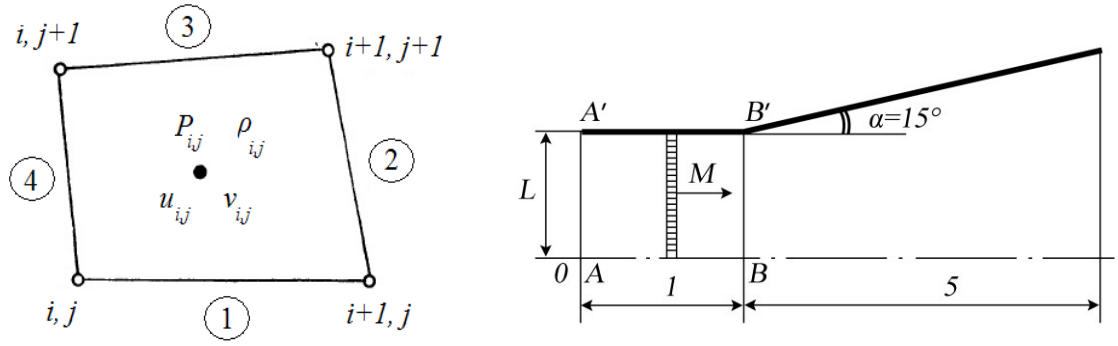
де ΔG – це площа розрахункової комірки; $\Delta\Gamma$ – це границя розрахункової комірки; P – це тиск; u, v – це компоненти швидкості повітряного потоку; ρ – густина; $E=\frac{u^2}{2}+\frac{v^2}{2}+\frac{P}{\rho(1-\gamma)}$ – це внутрішня енергія; $I=E+\frac{P}{\rho}$ – це ентальпія.

Параметри повітря за фронтом ударної хвилі визначаються на базі співвідношень Ренкіна–Гюгоніо.

На верхній та нижній границях розрахункової області має місце гранична умова «непротікання» Ця умова також реалізується на твердих границях всередині розрахункової області – залізничні вагони.

Ставиться мета – створити чисельну модель, що дає можливість розраховувати процес дифракції ударної хвилі в багатозв’язній області. Для побудови чисельної моделі використовується змінно-трикутна кінцево-різніцева схема (В. К. Хрущ, М. М. Біляєв).

Розрахункова область покрита неортогональною різницевою сіткою. Ескіз неортогональної розрахункової комірки показаний на рис. 6.33, а (В. К. Хрущ, М. М. Біляєв).



а) б)

Рисунок 6.33 – Розрахункові схеми: а) неортогональна розрахункова комірка; б) канал.

Чисельний розв'язок рівнянь Ейлера виконується наступним чином (В. К. Хрущ, М. М. Біляєв).

На першому кроці здійснюється апроксимація моделюючих рівнянь:

$$\frac{\rho_{ij}^{n+1}-\rho_{ij}^{n}}{\Delta t}\Delta G_{ij}+\sum_{k=1}^{4}(\rho_k^{+}W_k^{+}+\rho_k^{-}W_k^{-})^{n+1}\Delta s_k=0\,, \tag{6.22}$$

$$\frac{\rho\vec{V}_{ij}^{n+1}-\rho\vec{V}_{ij}^{n}}{\Delta t}\Delta G_{ij}+\sum_{k=1}^{4}((\rho\vec{V})_k^{+}W_k^{+}+(\rho\vec{V})_k^{-}W_k^{-})^{n+1}\Delta s_k+\sum_{k=1}^{4}P_k^{n+1}\vec{N}_k\Delta s_k=0, \tag{6.23}$$

$$\frac{\rho E_{ij}^{n+1}-\rho E_{ij}^{n}}{\Delta t}\Delta G_{ij}+\sum_{k=1}^{4}((\rho I)_k^{+}W_k^{+}+(\rho I)_k^{-}W_k^{-})\Delta s_k=0\,, \tag{6.24}$$

де $\rho_k^{+}W_k^{+}=\rho_{ij}^{n+1}\dfrac{1}{2}\left(V_{N,k}^{n+1}+\left|V_{N,k}^{n+1}\right|\right)$,

$$\rho_k^{-}W_k^{-}=\begin{Bmatrix}\rho_{i,j-1}^{n+1}\ for\ k=1\\ \rho_{i+1,j}^{n+1}\ for\ k=2\\ \rho_{i,j+1}^{n+1}\ for\ k=3\\ \rho_{i-1,j}^{n+1}\ for\ k=4\end{Bmatrix}\frac{1}{2}\left(V_{N,k}^{n+1}-\left|V_{N,k}^{n+1}\right|\right), \tag{6.25}$$

$$V_{N,k}^{n+1}=\frac{1}{2}(\vec{V}_{ij}\cdot\vec{N}_k)^{n+1}+\frac{1}{2}(\begin{Bmatrix}\vec{V}_{i,j-1}\ for\ k=1\\ \vec{V}_{i+1,j}\ for\ k=2\\ \vec{V}_{i,j+1}\ for\ k=3\\ \vec{V}_{i-1,j}\ for\ k=4\end{Bmatrix}\cdot\vec{N}_k)\ , \tag{6.26}$$

де $\overrightarrow{N}_k$ – це зовнішня нормаль до *k*–ї частини границі комірки.

Тиск на границі комірки визначається так:

$$P_k^{n+1} = \frac{1}{2} P_{ij}^{n+1} + \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} P_{i,j-1} \ for\ k=1 \\ P_{i+1,j} \ for\ k=2 \\ P_{i,j+1} \ for\ k=3 \\ P_{i-1,j} \ for\ k=4 \end{Bmatrix}. \tag{6.27}$$

Якщо ввести наступні позначення:

$$T_k^+ \rho_{ij}^{n+1} = \frac{1}{\Delta G_{ij}} \rho_k^+ W_k^+ \Delta s_k, \tag{6.28}$$

$$T_k^- \rho_{ij}^{n+1} = \frac{1}{\Delta G_{ij}} \rho_k^- W_k^- \Delta s_k, \tag{6.29}$$

$$L_k P_{ij}^{n+1} = P_k^{n+1} \Delta s_k \frac{1}{\Delta G_{ij}}, \tag{6.30}$$

то, використовуючи попередні рівняння, можемо записати так:

$$(E + \Delta t \sum_{k=1}^{4} (T_k^+ + T_k^-)) \rho_{ij}^{n+1} = E \rho_{ij}^n, \tag{6.31}$$

$$(E + \Delta t \sum_{k=1}^{4} (T_k^+ + T_k^-)) \rho \vec{V}_{ij}^{\,n+1} + \Delta t \sum_{k=1}^{4} L_k P_{ij}^{n+1} = E \rho \vec{V}_{ij}^{\,n}, \tag{6.32}$$

$$E \rho E_{ij}^{n+1} + \Delta t \sum_{k=1}^{4} (T_k^+ + T_k^-) \rho I_{ij}^{n+1} = E \rho E_{ij}^n. \tag{6.33}$$

На другому кроці записується різницева схема розщеплення (В. К. Хрущ, М. М. Біляєв):

$$\left(E + \frac{\Delta t}{2} (T_4^- + T_2^+ + T_1^- + T_3^+) \right) \rho_{ij}^{n+\frac{1}{4}} = E \rho_{ij}^n, \tag{6.34}$$

$$\left(E + \frac{\Delta t}{2} (T_2^- + T_4^+ + T_3^- + T_1^+) \right) \rho_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = E \rho_{ij}^{n+\frac{1}{4}}, \tag{6.35}$$

$$\left(E + \frac{\Delta t}{2} (T_4^- + T_2^+ + T_3^- + T_1^+) \right) \rho_{ij}^{n+\frac{3}{4}} = E \rho_{ij}^{n+\frac{1}{2}}, \tag{6.36}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}(T_2^- + T_4^+ + T_1^- + T_3^+)\right)\rho_{ij}^{n+1} = E\rho_{ij}^{n+\frac{3}{4}}, \tag{6.37}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{++}\right)\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+\frac{1}{4}} + \frac{\Delta t}{4}\sum_{k=1}^{4} L_k P_{ij}^{n+\frac{1}{4}}\vec{N}_k = E\rho\vec{V}_{ij}^{\,n}a, \tag{6.38}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{--}\right)\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{4}\sum_{k=1}^{4} L_k P_{ij}^{n+\frac{1}{2}}\vec{N}_k = E\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+\frac{1}{4}}, \tag{6.39}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{+-}\right)\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+\frac{3}{4}} + \frac{\Delta t}{4}\sum_{k=1}^{4} L_k P_{ij}^{n+\frac{3}{4}}\vec{N}_k = E\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+\frac{1}{2}}, \tag{6.40}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{-+}\right)\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+1} + \frac{\Delta t}{4}\sum_{k=1}^{4} L_k P_{ij}^{n+1}\vec{N}_k = E\rho\vec{V}_{ij}^{\,n+\frac{3}{4}}, \tag{6.41}$$

$$E\rho E_{ij}^{n+\frac{1}{4}} + \frac{\Delta t}{2}T^{++}\rho I_{ij}^{n+\frac{1}{4}} = E\rho E_{ij}^{n}, \tag{6.42}$$

$$E\rho E_{ij}^{n+\frac{1}{2}} + \frac{\Delta t}{2}T^{--}\rho I_{ij}^{n+\frac{1}{2}} = E\rho E_{ij}^{n+\frac{1}{4}}, \tag{6.43}$$

$$E\rho E_{ij}^{n+\frac{3}{4}} + \frac{\Delta t}{2}T^{+-}\rho I_{ij}^{n+\frac{3}{4}} = E\rho E_{ij}^{n+\frac{1}{2}}, \tag{6.44}$$

$$E\rho E_{ij}^{n+1} + \frac{\Delta t}{2}T^{-+}\rho I_{ij}^{n+1} = E\rho E_{ij}^{n+\frac{3}{4}}. \tag{6.45}$$

Тут використані такі позначення:

$$T^{++} = T_4^- + T_2^+ + T_1^- + T_3^+, \tag{6.46}$$

$$T^{--} = T_2^- + T_4^+ + T_3^- + T_1^+, \tag{6.47}$$

$$T^{+-} = T_4^- + T_2^+ + T_3^- + T_1^+, \tag{6.48}$$

$$T^{-+} = T_2^- + T_4^+ + T_1^- + T_3^+. \tag{6.49}$$

Остаточно ми отримуємо наступну схему розщеплення (В. К. Хрущ, М. М. Біляєв):

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{+-}\right)\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{-+}\right)\rho_{ij}^{n+1} = E\rho_{ij}^{n+\frac{1}{2}}, \tag{6.50}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{--}\right)\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{+-}\right)\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{-+}\right)\rho_{ij}^{n+1} = E\rho_{ij}^{n+\frac{1}{4}}, \tag{6.51}$$

$$\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{++}\right)\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{--}\right)\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{+-}\right)\left(E+\frac{\Delta t}{2}T^{-+}\right)\rho_{ij}^{n+1}=E\rho_{ij}^{n}. \qquad (6.52)$$

Оскільки ця чисельна схема має перший порядок точності, фронт ударної хвилі «розмазується» на деяких обчислювальних комірках.

Для формування вигляду розрахункової області використовуються маркери, які дають можливість задавати місце розташування об’єктів та їх форму.

Для розробки коду на основі описаної чисельної моделі використовувався FORTRAN. Розроблений код включає наступні підпрограми:

1. «DENS» – підпрограма для обчислення поля густини в обчислювальній області (підпрограма типу «SUBROUTINE»).

2. «VEL» – підпрограма для обчислення поля швидкості повітря в обчислювальній області (підпрограма типу «SUBROUTINE»).

3. «PRES» – підпрограма для обчислення поля тиску в обчислювальній області (підпрограма типу «SUBROUTINE»).

4. «P5GF» – підпрограма для зображення розповсюдження обчислених параметрів у розрахунковій області (підпрограма типу «SUBROUTINE»).

Координація усіх підпрограм виконується основною програмою.

Алгоритм рішення задачі полягає в наступному:

1. Формування блоку початкових даних (місце об’єктів, їх геометрична форма і т. д.).

2. Рішення рівнянь моделі газової динаміки (рішення рівнянь Ейлера).

3. Виведення «на друк» поля тиску для різних моментів часу.

Для проведення комп’ютерного експерименту потрібні такі дані:

1. Геометрична форма об’єктів.

2. Розміри об’єктів.

3. Тиск за фронтом ударної хвилі.

4. Розміри розрахункової сітки.

5. Розміри розрахункової області.

Особливості розробленої чисельної моделі газової динаміки:

1. Можливість рішення задач газової динаміки для довільної кількості об’єктів та їх форми.

2. Можливість проводити розрахунки для різної інтенсивність ударної хвилі.

3. Швидкість розрахунку 2-3с, що дає можливість, на практиці, провести серію комп’ютерних експериментів за стислий проміжок часу.

Для верифікації розробленої чисельної моделі було здійснено розрахунок задачі про рух ударної хвилі в каналі (рис. 6.33, б). На рис. 6.34 показано розподіл щільності (безрозмірне значення) повітряного потоку вздовж осі каналу (довжина каналу безрозмірна) для моменту часу 0,667 (число Маха ударної хвилі M=3, γ=1,4). На цьому ж рисунку наведені експериментальні дані, що отримані Головізніним В. П.

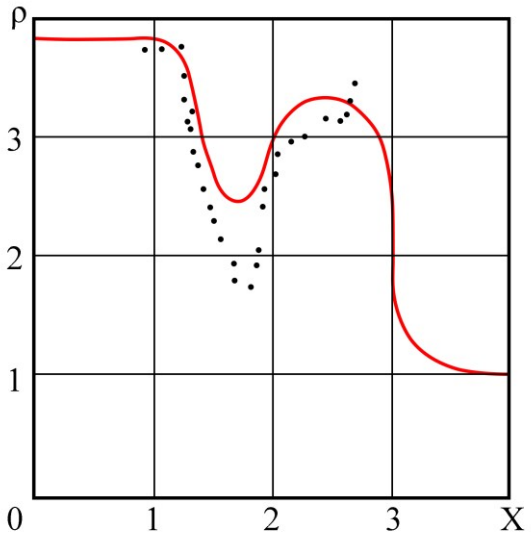


Рисунок 6.34 – Розподіл щільності повітря вздовж осі каналу:
● – експеримент (Головізнін В. П.); — – розрахунок.

Як видно з рис. 6.34, має місце задовільне узгодження експериментальних та розрахункових даних.

Нижче наведені результати рішення комп’ютерного моделювання на базі розробленої чисельної моделі. Як вже було вказано раніше – чисельна модель

газової динаміки розроблена для проведення моделювання руху ударної хвилі в багатозв’язній області.

Чисельний експеримент проводився для сценарію, коли тиск за фронтом ударної хвилі становив 15 атм. Безрозмірне поле тиску для різного часу дифракції ударної хвилі на двох об'єктах показано на рис. 6.35-6.37. Кожне число на рисунках показує значення тиску $P\times10$ відсотків від максимального значення тиску в розрахунковій області. Тобто, наприклад, якщо на рисунку є число «5», то це значення 50 % від максимального тиску. Час на рисунках також безрозмірний.

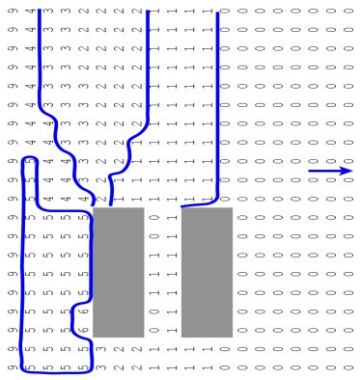


Рисунок 6.35 – Поле тиску для часу t=0,43.

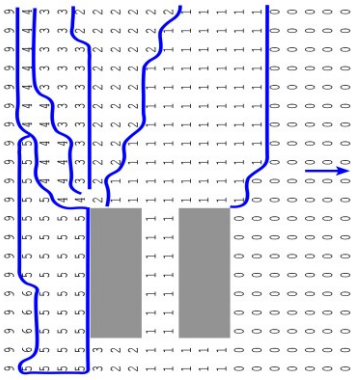


Рисунок 6.36 – Поле тиску для часу t=0,56.

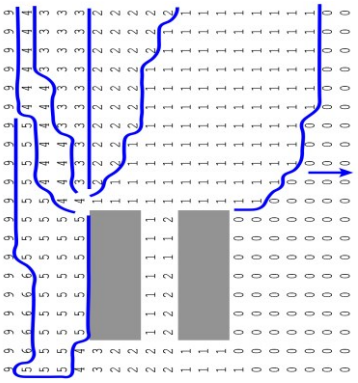


Рисунок 6.37 – Поле тиску для часу t=0,69.

Як видно з рис. 6.35-6.37, поле тиску поблизу об'єктів має складну форму, що зумовлено взаємодією ударної хвилі з об'єктами; тиск зростає біля першої перешкоди, що викликане розривом газового потоку на поверхні цього об'єкту. Варто відзначити, що час обчислення становив 3 с.

Висновки до розділу 6

1. Створено багатопараметричну математичну модель руху уламку в повітряному середовище та в «тілі» габіону.

2. На базі побудованої математичної моделі створено комп’ютерний код для

проведення обчислювального експерименту з метою визначення ефективності використання захисних перешкод (габіонів) на території промислового майданчика.

3. Проведено обчислювальний експеримент, який показав, що розроблена чисельна модель дає можливість визначити раціональну товщину габіону для різних матеріалів, що заповнюють «тіло» габіону, а також показав широкий робочий діапазон розробленої чисельної моделі.

4. Побудовано чисельні моделі для рішення багатопараметричних задач формування областей термічного ураження на промислових майданчиках у випадку пожежі, що базуються на числовому інтегруванні рівнянь аеродинаміки, теплопередачі та теплопровідності.

5. Запропоновані чисельні моделі можуть бути використані для первинної оцінки температурного поля всередині захисного бар’єру з метою визначення його ефективності з точки зору захисту областей від теплового забруднення на промисловому майданчику.

6. Побудовані чисельні моделі для розрахунку теплового забруднення повітря на промислових майданчиках базуються на явних формулах, що дуже зручно для їх кодування.

7. Розроблено ефективну чисельну модель для аналізу руху ударної хвилі на промисловому майданчику. Модель може бути використана для експрес оцінювання ризику баричного ураження на промисловому майданчику.

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 поверхі 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 нафтосховища; 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 нафтосховища від теплового навантаження, що виникає внаслідок екстремальних ситуацій на промисловому майданчику; модель дає можливість визначати зміну температури біля стінок нафтосховища 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 нафтосховища.

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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. 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.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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.

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. Біляєв М. М., Берлов О. В., Кіріченко П. С. Математичне моделювання в задачах промислової безпеки та охорони праці : монографія. Кривий Ріг : Вид. Р. А. Козлов, 2017. 130 с

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А., Якубовська З. М. Математичне моделювання нестаціонарного 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.

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

19. 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.

20. 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.

21. Біляєв М. М., Гільов В. В., Кіріченко П. С., Козачина В. А., Тимошенко О. А. Експериментальне та теоретичне дослідження аеродинаміки та масопереносу при використанні захисного екрану складної геометричної форми. *Український журнал будівництва та архітектури*. 2026. № 3. С. 39–44. DOI: https://doi.org/10.30838/UJCEA.0333.270526.39.1241

22. 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.

23. 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.

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

25. 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 симпозіуму «Тиждень еколога – 2021» (18-20 жовтня 2021 р.). Кам’янське: ДДТУ, 2021. С. 57-58.

26. 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.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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

36. 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.

37. Бочковський А. П., Сапожнікова Н. Ю. Розробка автоматизованої системи мінімізації професійних ризиків. *Екологічна безпека та збалансоване природокористування.* 2018. № 1 (17). С. 57–65

38. Глива В. А., Березуцький В. В., Березуцька Н. Л., Халіль В. В. Аудит ризиків безпеки на робочому місці. *Технологічний аудит та резерви виробництва.* 2016. № 2/3 (28). С. 12–17

39. ДСТУ IEC/ISO 31010:2013. Керування ризиком. Методи загального оцінювання ризику (IEC/ISO 31010:2009, IDT). [Чинний від 2014-07-01]. Київ: Мінекономрозвитку України, 2015. 80 с

40. Здановський, В., Глива, В., & Бурдейна, Н. (2022). Основні задачі імплементації міжнародних нормативів з охорони праці у правове поле України. *Екологічна безпека та природокористування*, *42*(2), 47–58. https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.2.47-58

41. Згуровський М. З., Скопецький В. В., Хрущ В. К., Біляєв М. М. Чисельне моделювання поширення забруднення в навколишньому середовищі. К.: Наук. думка, 1997. 368 с

42. Іконнікова Н. А., Юрченко А. А., Іконніков М. Ю. Экспериментальные исследования коэффициента захвата железорудной пыли каплями воды при ее орошении. *Зб. наук. пр. Нац. гірнич. ун-ту*. 2018. № 54. С. 363–377.

43. 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.

44. 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.

45. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісник КНУ ім. Михайла Остроградського.* 2010. Вип. 6. С. 1–4.

46. Про схвалення Концепції реформування системи управління охороною праці в Україні та затвердження плану заходів щодо її реалізації. Ропорядження Кабінету Міністрів України від 12 грудня 2018 р. № 989-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/989-2018-%D1%80#Text

47. Пшинько О. М., Біляєв М. М., Машихіна П. Б. Моделювання забруднення атмосфери при техногенних аваріях. Дніпро : Нова ідеологія, 2011. 166 с.

48. Серебреніков Е. В. Розробка методики визначення концентрації пилу на ділянках робочих зон кар'єрів при перевантаженні гірничої маси: автореф. дис. канд. техн. наук. Кривий Ріг, 2010. 20 с.

49. Ченчева О. О., Бурдейна Н. Б., Лашко Є. Є., Шевченко В. Г., Петренко І. С. (2022). Вплив пилоутворення при механічному обробленні карбон-карбонових композитів на ризик виникнення професійних захворювань. *Проблеми охорони праці в Україні*, *38*(3-4), 25–33. https://doi.org/10.36804/nndipbop.38-3-4.2022.25-33

50. Ченчева О. О., Лашко Є. Є., Рєзнік Д. В., Чеберячко Ю. І., Петренко І. С. Дослідження аеродинамічного процесу видалення вуглецевого пилу з робочої

зони. (2023). *Комунальне господарство міст*, *1*(175), 208-220. https://doi.org/10.33042/2522-1809-2023-1-175-208-220

51. A comparison of contaminant plume statistics from a Gaussian puff and urban CFD model for two large cities / Julie Pulen, Jay p. Boris, Theodore Young, Gopal Patnaik, John Iselin. *Atmospheric Environment*. 39 (2005). 1049–1068

52. Adnan Tolga Kurumus et al. Design and optimization of a porous fence for the reduction of wind erosion. Physics of Fluids (Preprint/ResearchSquare). 2023. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2423303/v1

53. Alan J. Cimorelli et al. Aermod: Description Of Model Formulation / EPA-454/R-03-004, September, 2004. P. 91.

54. ALOHA. Instruction Manual. US Environmental Protection Agency, 1999. 149 p.

55. Alvarez J. T., Alvarez I. D.&Lougedo S. T. Dust barriers in open pit blasts. Multifase Computitional Fluid Dynamics (CFD) simulations. *WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution* XVI, Vol 116. 2008. P. 85-93.

56. Appiah, A., Li, Y., Aram, S. A., Utip, I. B., Saalidong, B. M., & Li, Z. (2022). A Comparative Assessment of On-Site Application Effects of Mine Dust Prevention and Control Technology. Journal of Geoscience and Environment Protection, 10(9), 230-250. https://doi.org/10.4236/gep.2022.109014

57. Bennett J.S., Crouch K.G., Shulman S.A. Control of wake-induced exposure using an interrupted oscillating jet. Am Ind Hyg Assoc J. 2003. 64(1): 24–29.

58. Bennett J.S., Feigley C.E., Khan J., Hosni M.H. Comparison of emission models with computational fluid dynamic simulation and a proposed improved model. Am Ind Hyg Assoc J. 2003. 64(6):739–754.

59. Beychok M.R. Fundamentals of stack gas dispersion. 3rd ed. Milton R. Beychok: Newport Beach, CA, 1994.

60. Bhaskar R. Spatial and temporal behavior of dust in mines: theoretical and experimental studies [Dissertation]. University Park, PA: The Pennsylvania State University, Department of Mineral Engineering, 1987.

61. Bhaskar R., Ramani R.V. Dust flows in mine airways: a comparison of experimental results and mathematical predictions. In: Frantz RL, Ramani RV, eds. Publications produced in the Generic Mineral Technology Center for Respirable Dust in the year 1988. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Office of Mineral Institutes, 1989. pp. 31–39.

62. 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

63. Biliaiev M., Berlov O., Biliaieva V., Kozachyna V. A., Kozachyna V. V., Yakubovska Z. Modeling Influence of TiO_2 Barrier Coating on Pollutant Dispersion Near Road. *Proceedings of the 27th International Scientific Conference «Transport Means 2023»*. P. 511−517. ISSN 1822-296 X.

64. 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.

65. 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.

66. 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***)

67. 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.

68. 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.

69. 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.

70. 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.

71. 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.

72. 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.

73. 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.

74. 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.

75. Brolin Nils. Product Development of Curved Noise and NOx Barrier. *Master of Science Thesis*. Stockholm, Sweden, 2010. 51 p.

76. Brunner D.J., Miclea P.C., McKinney D., Mathur S. Examples of the application of computational fluid dynamics simulation to mine and tunnel ventilation. In: Proceedings of the Seventh U.S. Mine Ventilation Symposium (Lexington, KY, June 5–7, 1995). Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., pp. 479–484.

77. Calvin E. and Emmitt G. D. A Rail Emission Study: Fugitive coal dust Assessment and Mitigation, Simpson Weather Associates, Inc. D13066-6 - NSW Environment Protection Authority – Literature Review of Coal Train Dust Management Practices - Final December 2014 Page 84. URL: https://powerpastcoal.org/download/coal-dust-a-rail-emission-study-fugitive-coal-dust-assessment-and-mitigation/#)

78. Chatwin P. C. Quantitative Models of Environmental Pollution: a Review. *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling*.16 May–3 June. 1994. № SMR / 760–18.

79. Chiang H.S., Peng S.S. Development of dust distribution models for working faces. Vol. 1. Distribution model of airborne dust in longwall faces. Morgantown, WV: West Virginia University, Department of Mining Engineering. U.S. Bureau of Mines (USBM) grant No. G1135142, USBM open file report (OFR), 1990. 20–94.

80. Choi Wonsik, Hu Shishan, He Meilu, Kozawa Kathleen, Mara Steve, Fruin Scott, Winer Arthur and Suzanne Paulson. Spatial Heterogeneity of Roadway Pollutant in Los Angeles. Technology Forum on Near-Road Mitigation Measures and

Technologies, November 21, 2013. https://www.aqmd.gov/docs/default-source/technology-research/Technology-Forums/near-road-mitigation-measures/near_road_mitigation-agenda-presentations.pdf (Last accesed: 03.06.26).

81. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study B. Fabiano, F. Currт, A. P. Reverberi, E. Palazzi. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014. 92. P. 150–159.

82. Collett, R.S. and Oduyemi, K. (1997), Air quality modelling: a technical review of mathematical approaches. Met. Apps, 4: 235-246. https://doi.org/10.1017/S1350482797000455.

83. Courtney W.G., Cheng L., Divers E.F. Deposition of respirable coal dust in an airway. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1986. RI 9041. NTIS No. PB 87–139424

84. Courtney W.G., Kost J., Colinet J.F. Dust deposition in coal mine airways. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Technical Progress 1982. Report (TPR) 116. NTIS No. PB 82–19485.

85. De Faveri et al. Reduction of the environmental impact of coal storage piles: a wind tunnel study. *Atmospheric Environment.* 1990. Vol. 24A, No. 11. Pp. 2787-2793.

86. Deborah M. S. Madalozzo, Alexandre L. Braun, Armando M. Awruch. A numerical model for pollutant dispersion simulation in canyons. *Mecanica Computacional*. Vol. XXXI. P. 211–235

87. Deji Jing, Hongwei Liu, Tian Zhang, Shaocheng Ge, Shuaishuai Ren, Mingxing Ma. Study on coal dust diffusion law and new pneumatic spiral spray dedusting technology at transfer point of mine cross roadway. PLOS ONE. 2022; 17(8):e0272304. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272304

88. Derakhshani S. M., Schott D. L., Lodewijks G. Dust emission modelling around a stockpile by using computational fluid dynamics and discrete element method. *AIP Conf. Proc.* 18 June 2013; 1542 (1): 1055–1058. https://doi.org/10.1063/1.4812116.

89. Diego I., Pelegry A., Torno S., Torano J., Menendez M. Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles. Applied Mathematical Modelling. 2009. 33. P. 3197 – 3207

90. Dispersion Modeling of Hydrogen Sulfide at Cimarex Rands Butte Project Using ALOHA. Bureau of Land Management Pinedale Field Office.SWCA Environmental Consultants 1043 Coffeen Avenue, Suite D Sheridan, Wyoming 82801. January 2010. 26 p. URL: www.swca.com.

91. Du S, Chen H, Ding X, Liao Z, Lu X. Development of Dust Emission Prediction Model for Open-Pit Mines Based on SHPB Experiment and Image Recognition Method. *Atmosphere*. 2024; 15(9):1118. https://doi.org/10.3390/atmos15091118.

92. Dukic M., Planner J. H. Dust Emissions from Coal Wagons: Reducing Emissions from the Surface of Coal, Bulk Solids Handling Online article, accessed [2011]: https://forum.bulk-online.com/showthread.php?31729-Dust-Emissions-from-Coal-Wagons-Reducing-Emissions-from-the-Surface-of-Coal-(M-%C4%90 (Last accessed: 06.09.2020).

93. Dust Control Hand Book for Industrial Mineral Mining and Processing / Andrew B. Cecala et al, DHHS (NIOSH). Pittsburg, PA, 2012. № 112. P.186.

94. Ferreira, AD, Vaz P. A. Wind tunnel study of coal dust release from train wagons. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2004. 92. P. 565–577.

95. Ferreira AD, Viegas DX, Sousa ACM. Full-scale measurements for evaluation of coal dust release from train wagons with two different shelter covers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.* 91(10), P. 1271–1283

96. Final Report Environmental Evaluation of Fugitive Coal Dust Emissions from Coal Trains Goonyella, Blackwater and Moura Coal Rail Systems Queensland Rail Limited, 31 March, 2008, Reference H327578-N00-EE00.00

97. Frank Kreith, William Z. Black. Basic heat transfer. New York: Harper, 1980. 556 p.

98. Gopal Patnaik, Jay Boris. Fast3D-CT: an LES model for urban aerodynamics. *The fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010.

99. Government of Alberta. Protective Action Criteria : A Review of Their Derivation, Use, Advantages and Limitations. Enviro nmental Public Health Science Unit, Health Protection Branch, Public Health and Compliance Division, Alberta Health. Edmonton, Alberta, 32 p. URL: http://open.alberta.ca/publications/9781460131220

100. Hanna S. Air Quality Modelling over. Short Distances. *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling.* 16 May–3 June, 1994. № SMR/760–2. P. 712–743

101. Hao Wang, Weimin Cheng, Zhanyou Sa, Jie Liu, Ran Zhang, Dawei Chen. Experimental study of the effects of air volume ratios on the air curtain dust cleaning in fully mechanized working face. Journal of Cleaner Production. 2021; 293:126109. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126109

102. Hewitt A. Respirable dust sampling, research, and control in underground coal mines. In: Proceedings of Minesafe International Conference. Perth, Australia: Chamber of Mines and Energy of Western Australia, 1990.

103. Hwang CC, Singer JM, Hartz TN. Dispersion of dust in a channel by a turbulent gas stream. Pittsburgh, PA: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, 1974. RI 7854. NTIS No. PB 233 492.

104. Ilić Predrag, Ilić Svetlana, Stojanović Ljiljana. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON. 2018. №16. 38-45. https://doi.org/10.7251/QOL1801038I.

105. Integrated Pollution Prevention and Control Reference Document on Best Available Techniques on Emissions from Storage. EUROPEAN COMMISSION. 2006. July 2006.

106. Jinjun Guo et al. Numerical Simulation Study on Spatial Diffusion Behavior of Non-Point Source Fugitive Dust under Different Enclosure Heights. Int. J.

Environ. Res. Public Health. 2023; 20(5):4361. https://doi.org/10.3390/ijerph20054361

107. 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.

108. Kirk Winges, Richard Steffel Coal Dust from Rail Transport. Ramboll Environ US Corporation , 19020 33rd Avenue, Suite 310, Lynnwood, Washington 98036, 425-412-1800, 14 p.

109. Literature Review of Coal Train Dust Management Practices. *NSW Environment Protection Authority.* Milton, Australia. 1 December 2014. 112 p.

110. Marty, A., Daniel, E., Massoni, J. *et al.* Experimental and numerical investigations of shock wave propagation through a bifurcation. *Shock Waves* 29, 285–296 (2019). https://doi.org/10.1007/s00193-017-0797-6.

111. Mrinal K. Ghose Emission factors for quantification of dust in Indian coal mines. *Journal of Scientific @ Industrial Research*. September 2004. Vol. 63. P. 763–768.

112. Murakami S. Numerical simulation of turbulent flowfield around cubic model current status and applications of k−ϵ model and LES. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. Volume 33, Issues 1–2. P 139-152. https://doi.org/10.1016/0167-6105(90)90030-G.

113. Murakami S., Mochida A., Yoshihiko H. Comparison of *"k-ε"* model, ASM and LES with wind tunnel test for flow field around cub c model. *8th Intern. conf. on Wind Engineering. Western Ontario.* 1991. № 12–3.

114. NR2C New Road Construction Concepts. Towards reliable, green, safe & smart and human infrastructure in Europe. April 2008. https://cordis.europa.eu/docs/results/505/505831/124772331-6_en.pdf

115. Nakayama H., Jurcakova K., Nagai H. Large-Eddy Simulation of plume dispersion within various actual urban areas. *Advances in Science &Research.* 2013. 10. P.33–41.

116. NIOSH [2019]. Dust control handbook for industrial minerals mining and processing. Second edition. By Cecala AB, O'Brien AD, Schall J, Colinet JF, Franta RJ, Schultz MJ, Haas EJ, Robinson J, Patts J, Holen BM, Stein R, Weber J, Strebel M, Wilson L, and Ellis M. Pittsburgh PA: U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, DHHS (NIOSH) Publication No. 2019–124, RI 9701. https://doi.org/10.26616/NIOSHPUB2019124

117. Oduyemi K. Modelling dispersion of pollutants with a simple software: it is a practical approach. In: Zanetti P, ed. Computer techniques in environmental studies V. 1994. Vol. 1. Pollution modeling. Southampton, U.K.: Wessex Institute of Technology Press, pp. 25–32.

118. Ondrej Zavila, Pavel Dobes, Jakub Dlavka, Jan Bitta. The analysis of the use of mathematical modeling for emergency planning purposes. *The science for population protection*. 2015. 2. P.1–8.

119. Ouiza Bouaroura et al. 3D numerical simulation of airflow structure and dust emissions from an open storage pile behind a dynamic solid fence-deflector. Atmospheric Environment: X. 2024; 21:100245. https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2024.100245

120. QR Network, *Coal Dust Management Plan*, Coal Loss Management Project, Version DRAFT V10D, Date: 23rd May 2019. URL: https://www.yumpu.com/en/document/read/11682553/coal-dust-management-plan-aurizon/1

121. Ramani R.V., Bhaskar R. Dust transport in mine airways. In: Frantz RL, Ramani RV, eds. Publications produced in the generic mineral technology center for respirable dust in the year 1984. Washington, DC: U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines, Office of Mineral Institutes, 1988. pp. 25–31.

122. Reed W. R. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. *DHHS (NIOSH) Publication*. Pittsburgh, PA, 2005. 138. P. 24.

123. Revision of Emission Factors for AP-42, Section 11.9. Western Surface Coal Mining: Revised Final Report. *EPA Contract 68-D2-0159*, *MRI Project № 4604-02*, September 1998. P. 350.

124. Risk Assessment for Toxic Air Pollutants: A Citizen's Guide. EPA 450/3-90-024. March 1991

125. Robert Kotchenruther. Fugitive Dust from Coal Trains Factors Effecting Emissions & Estimating $PM_{2.5}$, *EPA Region 10, NW –AIRQUEST*, 2013.

126. 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

127. South West System Coal Dust Management Plan. 2013. November. Australia, 48 p.

128. Srinivasa R.B., Baafi E.Y., Aziz N.I.., Singh RN. Three dimensional numerical modelling of air velocities and dust control techniques in a longwall face. In: Proceedings of the Sixth U.S. Mine Ventilation Symposium (Salt Lake City, UT, June 21–23, 1993). Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., pp. 287–292

129. Sukach S., Kozlovs'ka T., Serhiienko I., Khodakovskyy O., Liashok I., Kipko O. Studying and substantiation of the method for normalization of air-ionic regime at industrial premises at the ultrasonic ionization of air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 4/10 (94). pp. 36–45.

130. Techarat Pet, Tontiwachwuthikul Paitoon. Coal dust dispersion from a coal storage pile. Songklanakarin Journal of Science and Technology. 2020. 42(3), 557-563. https://doi.org/10.14456/sjst-psu.2020.70.

131. The Computational Modeling of Baffle Configuration in the Primary Sedimentation Tanks / M. Shahrokhi, F. Rostami, Md Azlin Md Said, Syafalni. *2nd International Conference on Environmental Science and Technology.* Singapore, 2011. Vol. 6. P. 392–396

132. Torno S., Rodriguez R., Allende C., Toraño J. Dust emission reduction for open storage mineral piles by fences: CFD modelling. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2010. Vol 136. P.121 – 128.

133. Tripathy D. P., Dash T. R., Badu A., Kanungo R. Assessment and Modelling of Dust Concentration in Open Cast Coal Mine in India. *Global Nest Journal*. 2015. Vol. 17, № 4. P. 825–834.

134. Turner D., Wala A.M., Jacob J. Experimental study of mine face ventilation system for validation of numerical models. In: De Souza E, ed. Proceedings of the North American/Ninth U.S. Mine Ventilation Symposium (Kingston, Ontario, Canada). Lisse, Netherlands: Balkema, 2002. pp. 183–189.

135. Vanka Kanth, Shukla Shakti, Gomez Henry, James Carole, Palanisami Thava, Williams Kenneth, Chambers Daniel, Britton Warwick, Ilic Dusan, Hansbro Phil, Horvat Jay. (2022). Understanding the pathogenesis of occupational coal and silica dust-associated lung disease. European Respiratory Review. 31. 210250. 10.1183/16000617.0250-2021

136. 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.

137. Wala A.M., Stoltz J.R., Jacob J.D. Numerical and experimental study of a mine face ventilation system for CFD code validation. In: Proceedings of the Seventh International Mine Ventilation Congress (Krakow, Poland, June 17–22, 2001), pp. 411–417.

138. Wala A.M., Yingling J.C., Zhang J., Ray R. Validation study of computational fluid dynamics as a tool for mine ventilation design. In: Ramani RV, ed. Proceedings of the Sixth International Mine Ventilation Congress (Pittsburgh, PA, May 17–22, 1997). Littleton, CO: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., pp. 519–525.

139. Wen Nie, Bo Yang, Tao Du, Huitian Peng, Xu Zhang, Yilong Zhang. Dynamic dispersion and high-rise release of coal dust in the working surface of a large-scale mine and application of a new wet dust reduction technology. Journal of Cleaner Production. 2022; 351:131356. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131356

140. WHO global air quality guidelines. Particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization; 2021. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO

141. Wu T., Yang Z., Zhang K., Wang B. Optimization study on the application of induced dust suppression cover in primary crushing station of open-pit mine. Heliyon, 2023, 9, e16492. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16492

142. Yisheng Zhang et al. The Evaluation of Construction Dust Diffusion and Sedimentation Using Wind Tunnel Experiment. Toxics. 2022; 10(8):412. https://doi.org/10.3390/toxics10080412

143. Yumeng Zhao, Kingsly Ambrose. Predicting continuous dispersion and deposition of explosive dust in confined spaces using a discrete phase model. Powder Technology. 2022; 408:117704. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117704

144. Zahra Naserzadeh, Farideh Atabi, Faramarz Moattar and Naser Moharram Nejad. Effect of barriers on the status of atmospheric pollution by mathematical modelling. *Environmental Communication, Biosci. Biotech. Res. Comm.* 2017. 10 (1). P. 192–204

145. Zhang, Gang, Experimental Study on Shock Wave Propagation of the Explosion in a Pipe with Holes by High-Speed Schlieren Method. Shock and Vibration, 2020, 8850443, 9 pages. https://doi.org/10.1155/2020/8850443.

146. Zhaokun Fu, Qingwen Li. Study on Wind-Proof Effect and Stability of Windbreak Fence in Alpine Skiing Center. Sustainability. 2023; 15(4):3369. https://doi.org/10.3390/su15043369

147. Zheng, H., Jiang, B., Wang, H. *et al.* Experimental and numerical simulation study on forced ventilation and dust removal of coal mine heading surface. *Int J Coal Sci Technol* 11, 13 (2024). https://doi.org/10.1007/s40789-024-00667-z.

148. Zou C. Analysis on Dust Control Technology in Open-pit Quarry. Journal of Energy and Natural Resources, 2021, 10(1), 28–32. https://doi.org/10.11648/j.jenr.20211001.13

ДОДАТОК А
ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Міністерство освіти і науки України
Український державний університет науки і технологій

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор
д.т.н., проф. Радкевич А. В.

«08» 08 2025 р.

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Козачини Віталія Анатолійовича
у навчальний процес

Чинним актом підтверджується те, що результати дисертаційної роботи Козачини В. А. використовуються в навчальному процесі Українського державного університету науки і технологій при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (ОПП «Водопостачання та водовідведення»), 183 «Технології захисту навколишнього середовища» (ОПП «Захист довкілля та техногенна безпека»). Матеріали дисертаційної роботи, алгоритми та пакети програм використовуються при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Охорона праці в галузі та цивільний захист», «Охорона природного середовища від забруднення промисловими підприємствами», «Нормування антропогенного навантаження на навколишнє середовище», що дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання матеріалу при вивченні вказаних дисциплін.

Комп'ютерні програми та експрес-моделі використовуються студентами при виконанні дипломних бакалаврських робіт за спеціальністю 183 «Технології захисту навколишнього середовища».

Декан факультету «Будівництво,
архітектура та інфраструктура» к.т.н., доц. Андрій КРАСНЮК

Зав. каф. «Гідравліка, водопостачання
та фізика» д.т.н., проф. Микола БІЛЯЄВ

Затверджую:
Начальник Дніпровського відділення
філії «Проектно-вишукувальний інститут
залізничного транспорту»
АТ «Українська залізниця»
_____ Чірков О. Л.
«03» 03 _____ 2026 р.

АКТ
про впровадження результатів дисертації
Козачини Віталія Анатолійовича

В дисертації Козачини Віталія Анатолійовича (Український державний університет науки і технологій) розроблено комплекс нових чисельних моделей, що дозволяють вирішувати наступні класи прикладних задач:

- прогнозування забруднення повітря в робочих зонах у випадку зосереджених або розсіяних джерел емісії пилу або хімічно небезпечних речовин; математичне моделювання здійснюється на базі чисельного інтегрування багатовимірних рівнянь механіки суцільного середовища;
- прогнозування теплового забруднення повітря та нагріву об`єктів на промислових майданчиках у випадку екстремальних ситуацій, що пов'язані з виникненням джерел інтенсивної емісії тепла; моделювання здійснюється на базі багатовимірного нестаціонарного рівняння енергії та рівнянь аеродинаміки;
- дослідження ефективності використання спеціальних засобів захисту об'єктів на промислових майданчиках від ударної хвилі; моделювання здійснюється на базі чисельного інтегрування рівнянь Ейлера;
- оцінювання ризику ураження об'єктів на промислових майданчиках при вибуху дрону; моделювання здійснюється шляхом чисельного інтегрування рівнянь динаміки руху матеріальної точки.

Всі розроблені чисельні моделі реалізовано у вигляді спеціалізованих пакетів прикладних програм (кодів). Витрати комп'ютерного часу при практичній реалізації побудованих чисельних моделей складають декілька секунд на комп'ютерах малої та середньої потужності. Це є важливим фактором при використанні чисельних моделей на практиці.

Автором розроблено другий комплекс математичних моделей – емпіричні моделі, що дають можливість вирішувати наступні прикладні задачі:

- експрес-аналіз інтенсивності пилоутворення на промислових майданчиках при різних метеоумовах;
- експрес-аналіз ефективності використання води для зменшення пилоутворення на промислових майданчиках;
- експрес-аналіз впливу захисних бар'єрів складної форми, перфорованих бар'єрів на аеродинаміку повітряних потоків в межах промислового майданчику.

Розроблені чисельні моделі та пакети програм були використані у Дніпровському відділенні філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця» для оцінки ефективності різних засобів захисту повітря від пилового забруднення в проектній документації на капітальний ремонт/реконструкцію підприємств АТ «Укрзалізниця» Криворізького та Павлоградського районів.

Головний інженер відділення _____ Садченко О.В.
(посада) (підпис) (ПІБ)

Начальник виробничо-
технічного відділу _____ Дроздова О.Я
(посада) (підпис) (ПІБ)

ДОДАТОК Б

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА 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 нестаціонарного 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 метальної 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 нестаціонарної 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 симпозіуму «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 TiO_2 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. Р. 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. Р. 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. Р. 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 Р. 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. Р. 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. Р. 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. Р. 3–8. https://doi.org/10.5281/zenodo.17392477.