

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА
МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ОЛАДІПО МУТІУ ОЛАТОЙЄ

УДК 502.3: [504.6: 622.33]

ДИСЕРТАЦІЯ

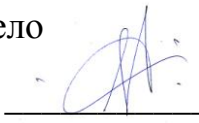
**МІНІМІЗАЦІЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ НАВКОЛИШНЬОГО
СЕРЕДОВИЩА ПРИ ПЕРЕВЕЗЕННІ ВУГІЛЛЯ В НАПІВВАГОНАХ**

101 – Екологія

10 – Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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



Оладіпо Мутіу Олатойє

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

Дніпро – 2020

АНОТАЦІЯ

Оладіно Мутіу Олатойє. Мінімізація рівня забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля в напіввагонах. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 101 – екологія. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів мінімізації рівня забруднення навколишнього середовища від пилового забруднення при перевезенні вугілля залізничним транспортом.

Транспортування вугілля від місць його видобутку здійснюється в напіввагонах. При цьому відбувається інтенсивний винос вугільного пилу з напіввагонів, що супроводжується забрудненням навколишнього природного середовища. Актуальність теми підтверджена тим, що аналіз сучасних методів мінімізації забруднення навколишнього середовища вугільним пилом показав, що вони потребують досить високих витрат, застосування додаткового обладнання на станціях навантаження (розвантаження) вугілля, витрат часу на імплементацію. Аналіз наукових публікацій показав необхідність створення ефективних і економічних методів захисту навколишнього середовища від забруднення при перевезенні вугілля залізничним транспортом. Установлено, що дослідження на базі лабораторних та польових експериментів процесів забруднення навколишнього природного середовища вугільним пилом вимагають значних матеріальних витрат, складного обладнання та великої кількості часу на проведення експерименту. Це створює значні труднощі при виконанні комплексних наукових досліджень з вивчення забруднення навколишнього

середовища при перевезенні вугілля. Для теоретичної оцінки рівня забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля найбільш широко використовується спрощена модель – модель Гаусса, у якій вагон з вантажем моделюється «точкою». Ця модель не бере до уваги форму вагона, не дозволяє врахувати залежність пиловиділення з поверхні вантажу від локальної швидкості повітряного потоку, що не дозволяє застосовувати таку модель для оцінки ефективності використання різних засобів захисту довкілля при перевезенні вугілля. Тому важливим питанням є створення теоретичних методів оцінки ефективності застосування засобів захисту навколишнього середовища від забруднення при перевезенні вугілля.

Як відомо, інтенсивність пилового забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля залежить від багатьох факторів, найважливішим з яких є швидкість повітряного середовища біля поверхні вантажу (локальна швидкість повітряного потоку). Тому для зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу з напіввагона в дисертації обрано засоби, які дозволяють зменшити значення локальної швидкості повітряного потоку біля поверхні вугілля. Для цього запропоновано використовувати спеціальні додаткові борти на вагоні з вугіллям, екрани. У дисертації на основі експериментальних та теоретичних досліджень показано, що застосування додаткових бортів спеціальної форми («вертикальна стінка», «крило», «внутрішнє крило») та екранів зменшує винос вугільного пилу з напіввагона. На основі проведених експериментальних досліджень встановлено закономірності формування зон забруднення підстильної поверхні при виносі вугільного пилу з вагонів без та з додатковими бортами або екранами.

Для визначення ефективності застосування спеціальних бортів, екрану розроблено комплекс чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати забруднення атмосферного повітря в разі перевезення вугілля в напіввагонах та при використанні запропонованих засобів захисту. Моделювання пилового забруднення повітря під час транспортування вугілля в напіввагонах

здійснюється на базі багатовимірних диференціальних рівнянь масопереносу. Моделювання процесу забруднення на базі цих рівнянь дозволяє отримувати інформацію про формування поля концентрації вугільного пилу в усій досліджуваній області, а не лише в деякій точці навколишнього середовища. Розроблені моделі дають можливість прогнозувати рівень пилового забруднення атмосферного повітря з урахуванням комплексу фізичних факторів, які раніше не враховувалися в ході досліджень, а саме: геометричної форми додаткових бортів, швидкості повітряного потоку біля поверхні вантажу, інтенсивності емісії вугільного пилу, дифузії вугільного пилу, швидкості руху вагона з вугіллям.

В роботі обґрунтовано застосування в напіввагонах повітряної завіси, що дозволяє зменшити пилове забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля.

Також набула подальшого розвитку математична модель прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, враховувати при прогнозі швидкість руху потяга з вугіллям і оцінювати рівень забруднення атмосферного повітря після проходження потягу з вугіллям. На основі проведених експериментальних досліджень та обробки даних експерименту отримана емпірична модель оцінки маси вугільного пилу, що виноситься повітряним потоком від поверхні вантажу.

Практична цінність роботи полягає в тому, що запропоновані методи захисту від пилового забруднення навколишнього природного середовища при перевезенні вугілля потребують невеликих економічних витрат на імплементацію. Виготовлення додаткових бортів та екранів може бути виконано із застосуванням типового промислового обладнання. Для імплементації запропонованих методів захисту не потрібно встановлювати спеціальне обладнання на навантажувальних станціях (місцях розвантаження вантажу), а також не потрібна спеціальна перепідготовка кадрів для їх обслуговування. Ефективність застосування запропонованих методів захисту

від пилового забруднення навколишнього природного середовища не залежить від кліматичних умов. Розроблені чисельні моделі дозволяють оперативно прогнозувати концентрацію вугільного пилу в атмосферному повітрі з урахуванням основних фізичних факторів, що впливають на процес пилового забруднення. Ці моделі дають можливість зменшити частку фізичного експерименту під час проведення досліджень у рамках розглянутого наукового напрямку. В роботі експериментальні результати порівнювалися з теоретичними, що були отриманими на базі побудованих чисельних моделей. Також була здійснена верифікація розроблених чисельних моделей.

Розроблені чисельні моделі та методи захисту довкілля використовуються в ТОВ «Енергосервіс-КР» для розробки технології захисту атмосферного повітря від забруднення при транспортуванні залізної руди та вугілля, а також у навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Ключові слова: забруднення довкілля, вугільний пил, моделювання забруднення, захист навколишнього середовища

SUMMARY

Oladipo Mutiu Olatoye. Minimization of environment pollution from coal trains». – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for Ph.D. degree in specialty 101 "Ecology". – Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro National University Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Dnipro, 2020.

The dissertation is devoted to the development of methods for minimizing the level of environmental pollution from dust pollution during coal transportation by rail.

The transportation of coal from its production sites is carried out in coal wagons. In this case intensive environment pollution takes place.

The analysis of modern methods of minimizing environmental pollution caused by coal dust showed that they require quite high costs, the use of additional equipment at stations of loading (unloading) of coal, much time for implementation. Analysis of scientific publications has shown the need to create effective and low cost methods of environment protection from pollution during the transportation of coal by rail.

It was established that scientific research of environment pollution from coal trains on the basis of laboratory and field experiments requires significant material costs, complex equipment and a large amount of time for the experiment. This creates significant difficulties in carrying out comprehensive research to study environmental pollution during coal transportation. For the theoretical assessment of the level of environmental pollution from coal trains, the most widely used simplified model is the Gaussian model, in which the coal wagon is modeled as a "point". This does not allow the use Gaussian model to assess the effectiveness of different protection methods which are used to minimize environment pollution during coal transportation. Therefore, an important problem is the development of

theoretical methods for assessing the effectiveness of protection methods aimed to minimize environment pollution during coal transportation.

It is known that the intensity of dust pollution during coal transportation depends on many factors, the most important of which is the speed of the air near the surface of the cargo (local air flow speed). Therefore, to reduce the intensity of coal dust emission from the wagon, in this dissertation, some tools were selected that reduce the value of the local air flow speed near the surface of the coal. For this purpose it is offered to use special additional boards on the coal wagon and screens. In this dissertation on the basis of experimental and theoretical researches it is shown that application of additional boards of the special form ("vertical wall", "wing", "internal wing") and screens reduces coal dust removal from a wagon. On the basis of the performed experiments the regularities of dust zones formation on the underlying surface, both for coal wagon without and with additional boards or screens, were established.

To determine the effectiveness of special boards, the screen application on the coal wagon a set of numerical models was developed. The models allow to predict air pollution in the case of coal transportation in wagons and when effectiveness of proposed means of environment protection. Modeling of dust air pollution during coal transportation in wagon is carried out on the basis of multidimensional differential mass transfer equations. Modeling of pollution process on the basis of these equations allows to obtain information about the formation of the coal dust concentration field in the whole study area, and not only at some point in the environment. The developed models allow to predict the level of atmosphere dust pollution taking with account of physical factors which were not previously taken into account in research works in this field, namely: geometric shape of additional boards, air flow speed near the cargo surface, coal dust emission rate, coal dust diffusion, wagon speed.

It was shown that use of air curtain at the coal wagon allows to reduce dust pollution of environment during coal transportation.

Also, the mathematical model for forecasting the level of air pollution during coal transportation in wagons has been developed, which allows, unlike existing models, to take into account the speed of coal train and estimate the level of air pollution after passing of the train. On the basis of the performed experiments and processing of obtained experimental data the empirical model to estimate the coal dust rate from a cargo surface was obtained.

The practical value of the work is that the proposed methods of environment protection during the coal transportation require low economic costs for implementation. The manufacture of additional boards and screens can be performed using standard industrial equipment. The implementation of the proposed methods of protection does not require the installation of special equipment at loading stations (places of unloading), and does not require special retraining of workers. The effectiveness of the proposed methods of protection against environment dust pollution does not depend on climatic conditions. The developed numerical models allow to predict quickly the concentration of coal dust in the air, taking into account the main physical factors influencing the process of dust pollution. These models make it possible to reduce the share of physical experiment during research study in this scientific field. The experimental results obtained were compared with the theoretical ones obtained on the basis of the developed numerical models. The developed numerical models were also verified.

Developed numerical models and methods of environmental protection are used in firm "Energoservice-KR" to develop technology to protect air from pollution during transportation of iron ore and coal, as well as in the educational process of the Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan.

Keywords: environmental pollution, coal dust, pollution modeling, environmental protection.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ
Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати
дисертації

Статті в наукових фахових виданнях України

1. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Минимизация интенсивности выноса пыли из полувагона при транспортировке угля. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті* : Науковий журн. 2016. № 11. С. 93–100. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
2. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Модели оценки уровня загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 5 (65). С. 22–29. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
3. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Проблема уноса угольной пыли. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 6 (66). С. 17–24. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
4. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Расчет динамики загрязнения примагистральной территории при перевозке угля. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 1 (67). С. 18–26. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
5. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Reducing of environmental pollution during coal transportation. *Collection of Research Papers of National Mining University*. 2017. № 52. P. 325 –329.
6. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Dust from coal trains: reducing of environmental pollution in work places near railway. *Науковий вісн. будівництва*. 2017. № 2 (88). С. 268–271.

7. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе, Гыркало А. В. Прогнозирование уровня загрязнения рабочих зон возле железнодорожной магистрали. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер.: Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве.* 2017 . Вып. 98. С. 61–67.

- монографія:

8. Беляєв Н. Н., Оладипо М. О., Кириченко П. С. Защита окружающей среды при транспортировке угля. Кривой Рог : Изд.: Р. А. Козлов, 2018. 92 с.

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

9. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. *East European Scientific Journal.* 2019. Vol 3(43). P. 10–15.

10. Modeling of the atmosphere pollution from coal trains / Mykola Biliaiev, Vitalii Kozachyna, Viktorolaiia Biliaieva, Mutiu Olatoye Oladipo and Kateryna Chernyatyeva. *MATEC Web of Conf. EOT-2019.* Lviv, 2019. Vol. 294. 6 p. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929402007>

Публікації у виданнях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование уноса угольной пыли. *Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали третьої міжнарод. науково-техн. конф. студентів, магістрів та аспірантів.* Харків : НТУ «ХП», 2016. С. 6.

12. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Экологические проблемы транспортировки сыпучих грузов железнодорожным транспортом. *Диференціальні рівняння та проблеми аерогідромеханіки й тепломасопереносу : тези доп. Всеукр. наук. конф. (28-30 вересня 2016 р., Дніпро).* Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т, 2016. С. 62.

13. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Теоретическое и экспериментальное исследование уноса угольной пыли. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки (частина II) : матеріали II Міжнародної науково-практ. конф.* (м. Київ, 29-30 листопада 2016 року). Київ : МЦНД, 2016. С. 15–16.

14. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Компьютерно-информационная система анализа уноса угольной пыли. *Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : тезисы X Международной научно-практ. конф.* (Днепр, 14-15 декабря 2016 г.). Днепр : ДИИТ, 2016. С. 90–91.

15. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Моделирование загрязнения окружающей среды при транспортировке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2016) : матеріали II Всеукр. науково-техн. конф. з міжнародною участю* (м. Дніпро, 1-3 листопада 2016 р.). Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2016. С. 26–27.

16. Оладипо М. О. Оценка уровня загрязнения воздушной среды возле железнодорожных магистралей с помощью информационной системы анализа уноса угольной пыли из вагонов. *Международный научный симпозиум «Неделя эколога – 2017»* (ДДТУ, Каменское, 10-13.04.2017). Каменское, 2017. С.35.

17. Беляев Н. Н., Якубовская З. Н., Козачина В. А., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование загрязнения транспортного коридора при перевозке угля. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018) : матеріали IV Міжнародної науково-техн. конф.* (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 р.). Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 38.

18. Беляев Н. Н., Козачина В. А., Оладипо М. О. Защита атмосферного воздуха от загрязнения при перевозке угля: эксперимент, математическое моделирование. *79-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та*

перспективи розвитку залізничного транспорту», 16-17.05.2019, Дніпро. Дніпро : ДНУЗТ, 2019. С. 293–294.

19. Оладипо М. О. Экспертная оценка загрязнения рабочих зон при перевозке угля. *77-ма Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 11-12.05.2017, Дніпро. Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 252.*

20. Оладипо М. О. Анализ загрязнения атмосферного воздуха при перевозке угля в полувагонах. Результаты лабораторных исследований и математического моделирования. *Науковий симпозіум «Тиждень еколога – 2019» (ДДТУ, Кам'янське, 07-10.10.2019). Кам'янське, 2019. С. 17.*

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
SUMMARY	6
ЗМІСТ	13
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ, ЩО ВИВЧАЄТЬСЯ	21
1.1 Негативний вплив вугільного пилу на навколишнє природне середовище.....	21
1.2 Проблема забруднення навколишнього природного середовища під час перевезення вугілля залізничним транспортом	22
1.3 Причини виносу пилу з вагонів під час перевезення вугілля	26
1.4 Методи захисту навколишнього середовища від забруднення поблизу транспортних коридорів.....	28
1.5 Аналіз методів дослідження процесу розсіювання вугільного пилу в атмосферному повітрі	38
1.6. Обґрунтування обраного наукового напрямку.....	44
Висновки до розділу 1	45
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ БІЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МАГІСТРАЛІ	46
2.1 Особливості досліджуваного явища	46
2.2 Моделі оцінки рівня забруднення атмосферного повітря вугільним пилом.....	48
2.3 Моделювання аеродинаміки вітрового потоку при обтіканні напіввагона з вугіллям	52
2.4 Оцінка інтенсивності виділення вугільного пилу під час перевезення вугілля ...	54
Висновки до розділу 2.....	57
РОЗДІЛ 3 ПОБУДОВА ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ	59
3.1 Формування виду розрахункової області	59
3.2 Чисельний розв'язок рівняння розсіювання вугільного пилу в атмосферному повітрі	61
3.3 Чисельний розв'язок задачі з визначення швидкості повітряного потоку	69
3.4 Розробка пакетів програм для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря	72
Висновки до розділу 3.....	74

РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЕРОДИНАМІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ В НАПІВВАГОНАХ.....	76
4.1 Дослідження інтенсивності виносу вугільного пилу	76
4.2 Дослідження забруднення атмосферного повітря в разі завантаження вугілля з «шапкою» у напіввагон	79
4.3 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів типу «вертикальна стінка» для захисту навколишнього середовища від пилового забруднення.....	85
4.4 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів типу «крило» для захисту навколишнього середовища від забруднення.....	90
4.5 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів типу «внутрішнє крило» для захисту навколишнього середовища від забруднення.....	94
4.6 Дослідження ефективності установки екрана у напіввагон для захисту навколишнього середовища від забруднення	97
4.7 Моделювання забруднення атмосферного повітря в селітебній зоні при русі потяга з вугіллям.....	106
Висновки до розділу 4.....	109
ВИСНОВКИ.....	111
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	113
ДОДАТОК А Тестові розрахунки.....	126
ДОДАТОК Б Документи впровадження результатів	131
ДОДАТОК В СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ	133

ВСТУП

Актуальність теми. У Нігерії, Україні та багатьох інших країнах ведуть інтенсивний видобуток вугілля. Його добувають у шахтах та кар'єрах, які розташовані на значній відстані від споживачів (промислові об'єкти, порти, теплостанції). Транспортують вугілля в напіввагонах, що супроводжується інтенсивним виносом з них вугільного пилу і, як наслідок, забрудненням як атмосферного повітря, так і підстильної поверхні біля залізничної магістралі. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка методів, які спрямовані на зниження рівня забруднення навколишнього природного середовища при перевезенні вугілля, при цьому є досить ефективними та практична реалізація яких не потребує великих економічних витрат. Важливим завданням також є створення методів розрахунку, які дозволять швидко оцінити ефективність таких методів захисту на етапі прийняття проектних рішень оскільки застосування фізичного моделювання для обґрунтування ефективності різних заходів захисту потребує великих затрат часу й матеріальних засобів.

Тому вирішення науково-прикладної задачі, щодо зниження рівня забруднення навколишнього природного середовища під час перевезення вугілля залізничним транспортом шляхом використання додаткових елементів на вагонах, які дозволяють зменшити виносу з них вугільного пилу є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Вибраний напрямок дослідження пов'язаний з планом виконання наукових робіт Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (ДНУЗТ): «Моделювання процесів забруднення навколишнього середовища при надзвичайних ситуаціях та організованих викидах забруднюючих речовин» (№ ДР 0115U 007226).

Мета та завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є зниження рівня забруднення навколишнього природного середовища під час перевезення вугілля залізничним транспортом.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- виконати аналіз факторів, що впливають на винос вугільного пилу з напіввагонів;
- проаналізувати сучасні методи захисту навколишнього природного середовища від забруднення при перевезенні вугілля в напіввагонах;
- проаналізувати сучасні моделі та методи, що використовуються для оцінки рівня забруднення довкілля при перевезенні вугілля;
- провести експерименти для підтвердження зменшення рівня пилового забруднення навколишнього природного середовища за рахунок установки в напіввагонах додаткових бортів спеціальної форми, екрана та повітряної завіси;
- розробити та верифікувати чисельні моделі для дослідження процесу забруднення навколишнього середовища при транспортуванні вугілля та для оцінки ефективності пропонованих способів захисту (додаткові борти, екран);
- удосконалити метод визначення рівня забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля з урахуванням траєкторії руху потягу;
- отримати залежність стосовно визначення інтенсивності емісії вугільного пилу від поверхні вантажу.

Об'єкт дослідження – процес розсіювання вугільного пилу в атмосферному повітрі під час перевезення вугілля в напіввагонах.

Предмет дослідження – методи мінімізації рівня забруднення навколишнього природного середовища під час перевезення вугілля залізничним транспортом.

Методи дослідження. Фізичне моделювання процесів масопереносу вугільного пилу з напіввагонів виконано в лабораторних умовах. Математичне моделювання процесу формування зон пилового забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля здійснено на базі фундаментальних рівнянь механіки суцільного середовища. Для чисельного інтегрування моделюючих рівнянь використовувалися неявні різницеві схеми розщеплення, на базі яких створено комп'ютерні програми для виконання обчислювальних експериментів.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертаційній роботі розв'язано важливе науково-прикладне завдання: мінімізація рівня пилового забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля в напіввагонах. Наукова новизна результатів, одержаних у ході вирішення цього завдання, полягає в такому.

Вперше:

– експериментально й теоретично обґрунтовано застосування в напіввагонах додаткових бортів спеціальної форми, що дозволяють зменшити пилове забруднення навколишнього природного середовища при перевезенні вугілля;

– експериментально й теоретично обґрунтовано застосування в напіввагонах екрана, що дозволяє зменшити пилове забруднення навколишнього природного середовища при перевезенні вугілля;

– експериментально обґрунтовано застосування в напіввагонах повітряної завіси, що дозволяє зменшити пилове забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля;

– розроблено чисельні моделі, що дозволяють на відміну від існуючих моделей, прогнозувати запиленість атмосферного повітря при перевезенні вугілля в напіввагонах з урахуванням форми додаткових бортів, екранів, швидкості потяга, метеоумов, інтенсивності емісії вугільного пилу.

Набули подальшого розвитку:

– математична модель прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля, що дозволяє, на відміну від існуючих моделей, враховувати при прогнозі швидкість руху потяга з вугіллям, траєкторію руху потягу, метеоумови і оцінювати рівень забруднення атмосферного повітря після його проходження;

– емпірична модель оцінки маси вугільного пилу, що виноситься від поверхні вантажу, яка дозволяє розрахувати інтенсивність емісії пилу при різній локальній швидкості повітря.

Практичне значення одержаних результатів. Практична цінність отриманих результатів полягає в такому:

1. Запропоновані методи захисту від пилового забруднення навколишнього середовища при транспортуванні вугілля вимагають невеликих економічних витрат на імплементацію. Додаткові борти та екран можуть бути виготовлені із застосуванням типового промислового обладнання.

2. Впровадження запропонованих методів захисту не потребує необхідності в установці спеціального обладнання на навантажувальних станціях (місцях розвантаження вантажу) і спеціальній підготовці кадрів для їх обслуговування.

3. Ефективність застосування запропонованих методів захисту від пилового забруднення навколишнього середовища не залежить від кліматичних умов.

4. Розроблені чисельні моделі дозволяють оперативно прогнозувати концентрацію вугільного пилу в атмосферному повітрі з урахуванням основних фізичних факторів, що впливають на процес пилового забруднення. Ці моделі дозволяють зменшити частку фізичного експерименту при проведенні досліджень у рамках розглянутого наукового напрямку.

Розроблені моделі використовуються в навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна для викладання дисциплін «Охорона природного

середовища від забруднення промисловими підприємствами», «Екологічна безпека». Розроблені методи зменшення рівня забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля в напіввагонах, розроблені комп'ютерні програми прогнозування забруднення навколишнього природного середовища використані у ТОВ «Енергосервіс-КР» для розробки технології захисту атмосферного повітря від забруднення при транспортуванні залізної руди та вугілля.

Особистий внесок здобувача. Особистий внесок автора в роботах, опублікованих у співавторстві, такий: виконано системний аналіз сучасних методів захисту від забруднення навколишнього середовища під час перевезення вугілля [8]; розроблено чисельну модель для оцінки рівня забруднення навколишнього середовища при транспортуванні вугілля [4, 9, 20]; проведено комплекс фізичних експериментів по аналізу формування зон забруднення при виносу вугільного пилю з вагонів, здійснена обробка, аналіз результатів дослідження [4 – 8, 12, 15 18]; проведено фізичний експеримент та отримана емпірична залежність по оцінке інтенсивності виносу вугільного пилю від ділянки грузу [9, 17]; розроблені чисельні моделі для прогнозування рівня забруднення довкілля при виносу вугільного пилю з вагонів, що мають додаткові борта, систему вдува, екран, здійснена їх програмна реалізація, проведені обчислювальні експерименти, обробка та аналіз результатів дослідження [1 -3, 7, 8, 10 – 14, 16 – 18].

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися: на Третій міжнародній науково-технічній конференції студентів, магістрів та аспірантів «Інформатика, управління та штучний інтелект» (Харків, 2016); Всеукраїнській науковій конференції «Диференціальні рівняння та проблеми аерогідромеханіки й тепломасопереносу» (Дніпро, 2016); II Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки» (Київ, 2016); X Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, у промисловості та освіті» (Дніпро,

2016); II Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2016)» (Дніпро, 2016); 77-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», (Дніпро, 2017); Міжнародному науковому симпозиумі «Тиждень еколога – 2017» (Кам'янське, 2017); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (Дніпро, 2018); Науковому симпозиумі «Тиждень еколога – 2019» (Кам'янське, 2019); 79-й Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту» (Дніпро, 2019).

В повному обсязі дисертація доповідалася на засіданні кафедри «Гідравліка та водопостачання» ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна 02.09.2019, протокол № 1.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 20 наукових праць, з яких: 9 – наукові статті (2 – в періодичних наукових виданнях інших держав; 7 – у фахових виданнях Переліку, затвердженого Атестаційною комісією МОН України); 1 – наукова монографія; 10 – тези доповідей.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 136 сторінок, з них основний текст розміщено на 98 сторінках; містить 72 рисунка, 8 таблиць. Список використаних літературних джерел містить 108 бібліографічних назв.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ, ЩО ВИВЧАЄТЬСЯ

У цьому розділі аналізуються фактори, що призводять до виносу вугільного пилу з вагонів, і методи зменшення пилового забруднення навколишнього середовища під час перевезення вугілля. Також розглядаються теоретичні та експериментальні методи вирішення завдань такого класу.

1.1 Негативний вплив вугільного пилу на навколишнє природне середовище

Забруднення повітряного середовища, підстильної поверхні пилом відноситься до вкрай небезпечних явищ в галузі екології [25, 27, 28, 35, 36, 38, 50, 54, 59, 66, 67]. В рамках цієї проблеми можна виділити забруднення природного навколишнього середовища пилом при перевезенні вугілля [4, 69, 74, 75, 77-83, 89]. Вугільний пил, що виноситься з напіввагонів (рис.1.1), має суттєвий негативний вплив на навколишнє природне середовище.



Рисунок 1.1 – Винос пилу з напіввагонів під час транспортування вугілля

(<https://images.app.goo.gl/fPdPY1FJt3Gushxm7>)

Цей пил потрапляє на рослинність, ґрунт, але у зв'язку з рухом повітряних потоків, а також рухом потягів у транспортному коридорі пил з

рослинності, ґрунту знову піднімається в атмосферне повітря та створює нову хмару біля транспортного коридору. Далі ця хмара поширюється в атмосферному повітрі та призводить до забруднення інших територій, що прилягають до транспортного коридору (вторинне забруднення навколишнього природного середовища). Хмара дрібнодисперсного вугільного пилу може дуже довго залишатися в приземному шарі атмосфери. Тому людина, яка перебуває біля транспортного коридору, потрапляє під її вплив. Вдихання людиною дрібнодисперсного вугільного пилу може призвести до появи низки захворювань (наприклад, бронхіту та ін.) Вугільний пил потрапляє в глибинні відділи дихальних шляхів. Крім цього, він може проникати в пори деяких залоз та викликати їх закупорювання. Унаслідок цього може виникати запальний процес в організмі.

Слід підкреслити, що вугільний пил має дуже негативний вплив на властивості ґрунту та рослин: зменшується родючість та концентрація гумінових речовин у ґрунті, спостерігається негативна трансформація обміну речовин у рослинах. Як наслідок, наявне пригнічення фітоценозів, зниження біологічної різноманітності. Крім цього, вугільний пил, що потрапляє на рослини, зменшує поглинання сонячної енергії, що дуже необхідна для рослин. Також, потрапляючи на ґрунт, він є однією з причин виникнення процесів ерозії ґрунту.

1.2 Проблема забруднення навколишнього природного середовища під час перевезення вугілля залізничним транспортом

Сьогодні в Нігерії ведеться інтенсивний видобуток вугілля (рис. 1.2). Його транспортування від місця видобутку до промислових центрів і портів здійснюється в цій країні залізничним транспортом. Це зумовлено двома причинами:

1. У Нігерії є досить розвинена залізнична мережа, що з'єднує вуглевидобувні райони з промисловими регіонами й портами (рис. 1.3).

2. Перевезення вугілля залізничним транспортом забезпечує низьку вартість доставки вантажу в промислових обсягах.



Рисунок 1.2 – Видобуток вугілля в Нігерії

(<https://panafricanvisions.com/2020/05/a-shift-from-coal-mining-is-urgently-needed-to-protect-the-lives-of-rural-communities-in-nigeria/>)

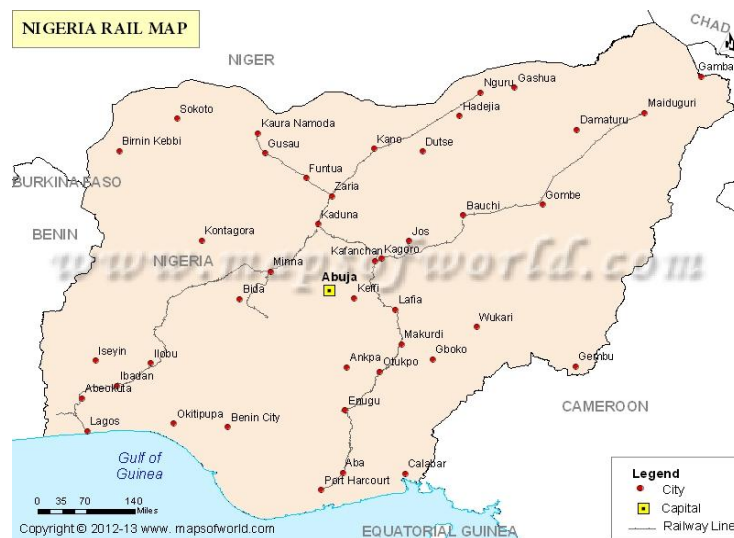


Рисунок 1.3 – Залізнична мережа Нігерії

(<https://www.mapsofworld.com/nigeria/rail-map.html>)

Однак відомо, що транспортування вугілля в напіввагонах призводить до великої проблеми, а саме: виносу вугільного пилу з напіввагонів, формування концентраційного поля пилу над вантажем, у транспортному коридорі й на прилеглий до магістралі території. Такий винос

дрібнодисперсних фракцій вугільного пилу з напіввагонів у зарубіжній літературі отримав назву «fugitive dust emission» [90, 95, 96, 100, 102]. Як зазначається в наукових працях, присвячених цим дослідженням [74, 87, 89, 92, 101], зараз ще маємо дефіцит знань щодо процесу розсіювання вугільного пилу в повітряному середовищі транспортних коридорів. Крім цього, основним пріоритетом наукових досліджень у цій сфері залишається розробка стратегії з мінімізації забруднення навколишнього середовища під час транспортування вугілля.

Під час транспортування вугілля в умовах жаркого клімату (Нігерія) відбувається швидка втрата вологи у вантажі, що перевозиться в напіввагоні, знижуються сили адгезії між частинками вугілля. Тому під час такого транспортування швидко виникають умови для інтенсивного виносу вугільного пилу з напіввагонів.

При транспортуванні в напіввагонах наявні втрати вантажу (так, згідно з [25], втрата вантажу на один вагон може становити приблизно 0,5 т у разі перевезення вугілля на відстань менше ніж 500 км і майже 1 т у разі перевезення вугілля на відстань понад 500 км). Крім цього, погіршуються властивості вантажу та його зовнішній вигляд.

Слід звернути увагу на те, що метою дослідження в зарубіжних наукових публікаціях, присвячених вивченню проблеми виносу вугільного пилу з напіввагонів, є визначення маси винесеного пилу без розкладання його на фракції.

Крім проблеми забруднення навколишнього середовища (рис.1.4), винос вугільного пилу з напіввагонів створює загрозу здоров'ю людей, які перебувають біля транспортного коридору. Пил також може потрапляти не тільки в селітебну зону (рис.1.5), але й всередину локомотивів, вагонів інших потягів, які рухаються транспортним коридором.



Рисунок 1.4 – Працівники залізниці в забрудненому транспортному коридорі

(<https://media.gettyimages.com/photos/two-railway-workers-picture-id458131533?s=170667a>)



Рисунок 1.5 – Забруднення селітебної зони під час перевезення вугілля
(<https://energynews.us/2013/02/20/midwest/research-finds-additional-harm-from-coal-dust-exposure/>)

Крім цього, під час проходження вантажного потяга з вугіллям по залізничних станціях спостерігається потрапляння вугільного пилу на технічні споруди залізниці (вокзали, диспетчерські, складські приміщення тощо), тобто відбувається забруднення повітряного середовища там, де перебувають працівники станції (диспетчери, чергові по станції, складачі потягів, сигналісти і т. д.).

1.3 Причини виносу пилу з вагонів під час перевезення вугілля

Аналіз літературних даних показав, що проблема виносу вугільного пилу під час перевезення вугілля є дуже актуальною сьогодні [25, 74, 78, 80-81, 88, 103, 106-107]. В цих працях було виконано комплексний аналіз і узагальнення результатів вивчення процесів виносу вугільного пилу під час транспортування вугілля. Джерелами емісії можуть бути викиди пилу з люків, викид від поверхні вантажу тощо. Як свідчать результати вивчення наукових публікацій [80-82, 87-89], найбільш потужним джерелом пиловиділення є винос пилу з поверхні вантажу у вагоні. Він відбувається під дією низки факторів. Системний аналіз літературних джерел дозволив видокремити такі фактори:

- 1) тип вугілля;
- 2) вологовміст вантажу;
- 3) розмір часток вугілля;
- 4) розмір відкритої частини вагона;
- 5) форма «шапки» вантажу та її розміри;
- 6) положення та вібрація вагона в потязі;
- 7) швидкість потяга;
- 8) швидкість вітру, його напрямок;
- 9) опади, що потрапляють на вантаж під час його транспортування;
- 10) наявність або відсутність спеціальних засобів погашення пиловиділення;
- 11) локальна швидкість повітряного потоку біля поверхні вантажу.

Потрібно підкреслити, що найважливішим параметром, який впливає на інтенсивність емісії вугільного пилу з напіввагона, є швидкість повітряного потоку біля поверхні вантажу, тобто локальна швидкість потоку. На рис.1.6 показана схема відриву часток вугілля від поверхні вантажу: при малій локальній швидкості повітря спостерігається рух часток по поверхні вантажу (creep) або біля його поверхні (saltation). Але коли локальна швидкість повітряного потоку перевищує граничне значення (так звана

порогова швидкість), наявний відрив часток від поверхні вантажу (suspension) та їх дрейф з повітряним потоком.

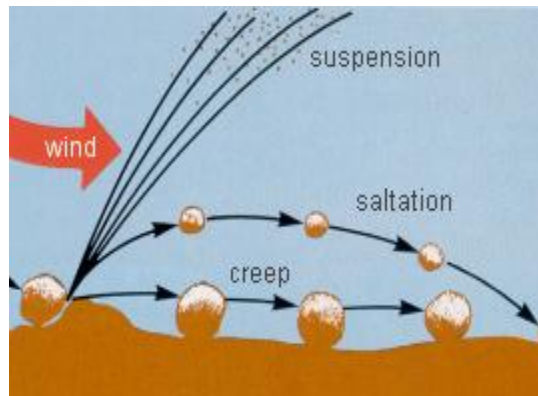


Рисунок 1.6 – Схема відриву часток вугілля від поверхні вантажу (<https://courses.lumenlearning.com/suny-geophysical/chapter/transport-of-particles-by-wind/>)

Ця інформація є дуже важливою, адже вона окреслює шлях щодо вирішення проблеми зменшення інтенсивності емісії вугільного пилу з напіввагона, а саме: якщо зменшити локальну швидкість повітряного потоку – знизиться інтенсивність відриву часток пилу та їх дрейф у повітря. Зменшення локальної швидкості може бути досягнуто за рахунок аеродинамічного впливу на потік у напіввагоні. Такий підхід і був використаний у цій роботі.

Слід вказати, що складність наукового дослідження задач такого класу пов'язана з тим, що цей параметр залежить від швидкості потяга, швидкості вітру та його напрямку, які постійно змінюються в процесі руху потяга. У багатьох випадках швидкість повітряного потоку, індукованого рухом потяга, складається зі швидкості вітру, що створює найгірші аеродинамічні умови за пилорозділенням від поверхні вантажу. Зробити дослідження у ході проведення натурного експерименту, коли потяг рухається в умовах складного рельєфу місцевості, робить повороти, гальмування тощо, – практично неможливо.

Існують додаткові фактори, які впливають на інтенсивність пиловиділення під час перевезення вугілля, а саме:

- 1) кількість локомотивів у потязі (у США, наприклад, можуть використовуватися до 6 локомотивів);
- 2) тип локомотива та його технічний стан;
- 3) технічний стан вагонів;
- 4) прискорення під час руху потяга;
- 5) прямування зустрічного потяга;
- 6) рельєф місцевості.

Таким чином, процеси пиловиділення під час перевезення вугілля й забруднення навколишнього середовища в транспортних коридорах є багатофакторними, що вкрай ускладнює проведення фізичних експериментів і створення універсальної моделі для їх прогнозування. Дослідження процесів пилового забруднення навколишнього середовища в транспортних коридорах залишається актуальною науково-дослідною проблемою.

1.4 Методи захисту навколишнього середовища від забруднення поблизу транспортних коридорів

Для мінімізації процесу забруднення навколишнього середовища під час перевезення вугілля використовуються різні методи. На основі відомих літературних даних [80-81, 89] було виконано аналіз цих методів, виділено їхні переваги й недоліки. Нижче наведено результати цього аналізу. У низці випадків при аналітичній оцінці деяких методів також зазначена їхня ефективність за шкалою, прийнятою в Австралії: High, Medium, Low.

Огляд наукових праць, присвячених проблемі виносу вугільного пилу з напіввагонів, показав, що для її вирішення використовуються такі методи:

1. Закладення щілин на вагоні. Для цього використовуються плівкові матеріали, пасти, спеціальні мастики.

Переваги: такий спосіб дозволяє запобігти висипанню вантажу через щілини в напіввагонах і тим самим зменшити надходження пилу в

навколишнє середовище під час транспортування. Вартість матеріалів відносно невисока, і транспортні компанії це можуть дозволити без шкоди для свого бюджету.

Недоліки: такий спосіб не дає можливості зменшити пиловиділення з поверхні вантажу в напіввагоні. Потрібна наявність спеціальних матеріалів, пунктів із закладення щілин, необхідний періодичний огляд вагонів і закладення щілин, якщо сталося руйнування плівкового матеріалу, тощо. Необхідний персонал, щоб обстежити, обробити велику кількість вагонів.

2. Ущільнення вантажу в напіввагоні (рис. 1.7). *Переваги:* згідно з літературними даними дозволяє знизити пиловиділення за рахунок збільшення сил адгезії між частками пилу.

Недоліки: потрібна наявність спеціальних пунктів з обладнанням (котки, вібратори), щоб виконувати розрівнювання (й ущільнення) поверхні вантажу, та спеціально підготовлений персонал. Робота вібраторів призводить до динамічного впливу на з'єднання вагонів, що прискорює їх руйнування. Збільшується час на підготовку вантажу перед його відправкою.



Рисунок 1.7 – Застосування спеціального котка для розрівнювання й ущільнення поверхні вантажу

(http://p-zpo.ru/images/stories/flexicontent/item_34_field_16/1_urus2.jpg)

3. Обмеження висоти шапки вантажу в напіввагоні. Для зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу з напіввагона рекомендується формувати «шапку» вантажу не більше ніж на 750 мм вище

бортів (рис. 1.8, 1.9). *Переваги:* такий підхід дозволяє зменшити площу поверхні, що обдувається, а отже, зменшити величину емісії пилу.



Рисунок 1.8 – Обмеження по висоті «шапки» вантажу («шапка» вантажу незначно перевищує висоту борту)

(https://bl.thgim.com/migration_catalog/article18178902.ece/alternates/WIDE_615/BL22_P2_WAGON)



Рисунок 1.9 – Обмеження по висоті «шапки» вантажу («шапка» вантажу перевищує висоту бортів, але в межах рекомендацій)

(<https://image.shutterstock.com/image-photo/freight-train-wagons-full-coal-260nw-347157941.jpg>)

Недоліки: зі збільшенням швидкості потяга та швидкості вітру пиловиділення з поверхні вантажу буде зростати й ефективність методу знижується.

4. Встановлення дефлекторів у напіввагони. На торцевих боках вагона можуть встановлюватися дефлектори типу «hungry board» (рис. 1.10) і похилі пластини (рис. 1.11). Ці елементи впливають на аеродинаміку

повітряного потоку біля верхньої частини напіввагона, внаслідок цього відбувається зміна інтенсивності емісії пилу під час транспортування вугілля. З кількісного погляду ефективність застосування таких дефлекторів у літературі не конкретизується.



1 – дефлектор «hungry board» (Австралія)

Рисунок 1.10 – Застосування дефлекторів у напіввагоні
(<http://medicalrepublic.com.au/wp-content/uploads/2019/07/Screen-Shot-2019-07-17-at-11.00.18-am-680x334.png>)



Рисунок 1.11 – Застосування похилих пластин у напіввагоні
(Австралія)

([http://2.bp.blogspot.com/-POZRFm5aJIw/UhqP0aA6xQI/AAAAAAAAAF-Y/IzQk_UNRN6Q/s1600/_3-Fish+Wagon+\(Large\).jpg](http://2.bp.blogspot.com/-POZRFm5aJIw/UhqP0aA6xQI/AAAAAAAAAF-Y/IzQk_UNRN6Q/s1600/_3-Fish+Wagon+(Large).jpg))

Недоліки: необхідна модернізація конструкції вагона безпосередньо на заводі, матеріальні витрати.

5. Подача води на поверхню вантажу. Цей метод відносно простий у реалізації. Подача води становить майже 2 л/м². Зростання вологості вантажу приводить до збільшення сил адгезії між частинками вугілля.

Ефективність цього методу має рівень «Medium» («середній») у разі транспортування вантажу протягом 2 годин і рівень «Low» («низький») у разі транспортування понад дві години [89]. *Переваги* – вартість цього підходу менш, ніж використання спеціальних розчинів, що надаються на вантаж.

Недоліки: необхідні насоси, розподільні пристрої для подачі води, контрольно-вимірювальне обладнання, а також посудини із запасом води. Наприклад, у Нігерії цей спосіб не може бути застосований, оскільки в країні є суттєва нестача води, а також через високу температуру навколишнього середовища практично цілий рік (відбуватиметься швидке випаровування води з поверхні вантажу й ефективність методу різко знизиться).

6. Покриття вантажу спеціальними розчинами. Цей метод зменшення виносу вугільного пилу з напіввагона застосовується в деяких країнах. Подача розчину на поверхню вугілля призводить до збільшення сил адгезії між частинками. Витрата розчину на поверхню вантажу встановлюється дослідним шляхом і залежить від низки факторів, зокрема від властивостей того чи іншого розчину, температури навколишнього середовища тощо.

Переваги: для виготовлення розчинів часто використовуються відходи різних виробництв, тобто цей підхід можна частково розглядати також як утилізацію відходів.

Ефективність цього методу має рівень «Medium / High» («середній / високий») [89].

Недоліки: необхідні центри (так звані «veneering stations») з приготування розчину в достатній кількості, посудини для його зберігання,

обладнання для подачі розчинів на поверхню вантажу, а також датчики й монітори для контролю якості обробки вантажу та пристрої для захисту навколишнього середовища від забруднення під час подачі розчину. Застосовувані розчини повинні створювати плівки, які мають достатню адгезію, міцність і демпфівальну здатність, щоб протистояти динамічним навантаженням. У разі, наприклад, вібрації вагона, перепаду температур може відбутися руйнування захисної плівки. У деяких випадках ціна спеціального розчину може бути досить високою.

7. Накривання вантажу брезентом (рис. 1.12). *Переваги:* ефективний спосіб зменшення виносу пилу під час транспортування вантажу, тому що забезпечується його контейнеризація.



Рисунок 1.12 – Накривання вантажу брезентом

(<https://5.imimg.com/data5/QY/CC/PO/IOS-22159606/product-jpeg-500x500.png>)

Недоліки: потрібна досить велика кількість брезенту або подібного матеріалу для накривання вантажу у вагонах. Збільшується час на підготовку вантажу до відправки. Потрібен час на процедуру розкриття вантажу перед розвантаженням вагонів. Під час експлуатації можливе руйнування матеріалу покриття. Можливе знесення брезенту в ході перевезення.

8. Профілювання форми «шапки» вантажу в напіввагоні.

Рекомендації щодо профілювання форми вантажу в напіввагоні (рис. 1.13) розроблені фірмами BNSF Railway Company (Австралія) і UNION PACIFIC (США). Доступ до результатів досліджень, на основі яких отримані рекомендації, відсутній. Відомо, що метою профілювання є уникнення наявності «гострих» кутів у формі «шапки» вантажу (рис. 1.14).

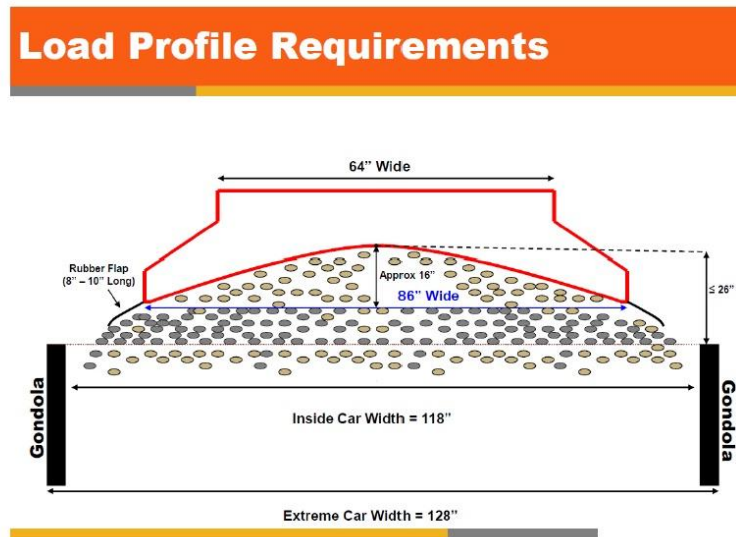


Рисунок 1.13 – Рекомендації BNSF Railway Company з профілювання поверхні вантажу [89]



Рисунок 1.14 – Профілювання поверхні вантажу, поверхня типу «garden bed» (Австралія) [89]

Переваги: вважається, що за рахунок надання спеціальної форми «шапці» вантажу, розмірів цієї «шапки», наявності щілин між вантажем і стінками вагона можна зменшити пиловиділення з поверхні вантажу. Також вантаж може розподілятися в напіввагоні у вигляді набору «купок». У літературі відсутні дані, що дозволяють оцінити такий розподіл з кількісної позиції.

Ефективність цього методу має рівень «Low / Medium» («середній / низький») [89].



Рисунок 1.15 – Пункт завантаження вугілля (Австралія) [89]

Недоліки: необхідне спеціальне обладнання (рис. 1.15), збільшується час на відправку вантажу через надання необхідної форми «шапці» вантажу.

9. Контейнеризація вантажу. *Переваги:* ефективний засіб захисту навколишнього середовища від забруднення, оскільки наявна «герметизація» вантажу.

Недоліки: потрібна наявність спеціально виготовлених вагонів. Високі матеріальні витрати.

10. Застосування спеціальних, додаткових кришок, що встановлюються на вагон. У напіввагоні встановлюється додаткова кришка, яка може повністю (рис. 1.16) або частково (рис. 1.17) накривати вантаж.



Рисунок 1.16 – Модернізований напіввагон для перевезення вугілля, на який встановлена кришка, Австралія (для порівняння див. рис. 1.11)

[89]

Переваги: ефективний засіб захисту навколишнього середовища від забруднення, тому що відбувається зменшення площі поверхні пиловиділення (частково або повністю).

Ефективність цього методу має рівень «High» («високий») [89].

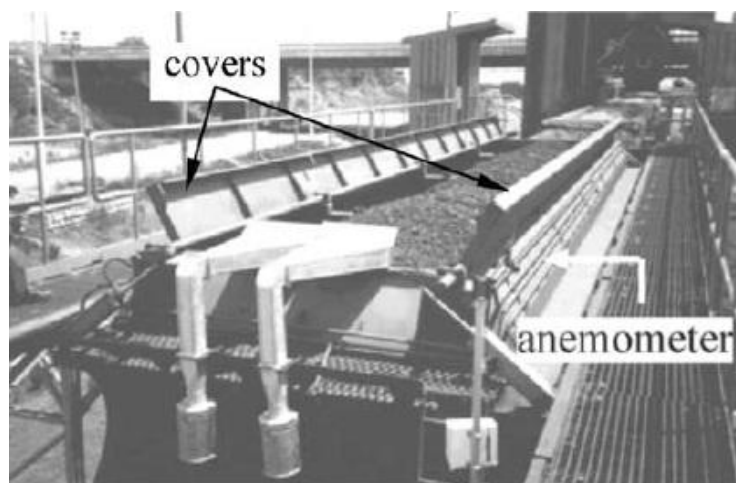


Рисунок 1.17 – Використання кришок типу «стулки» у напіввагоні [80] (кришки підняті й перебувають в неробочому стані), Португалія

Недоліки: для установки кришки потрібна модернізація напіввагона на заводі. Високі матеріальні витрати – вартість однієї кришки в Австралії становить майже 10 тис. доларів. Під час транспортування вантажу можливе падіння кришки з вагона, що створить надзвичайну ситуацію в транспортному коридорі.

11. Застосування спеціальних тунелів, всередині яких рухаються вагонетки з вугіллям. *Переваги:* повна ізоляція навколишнього середовища від вугільного пилу, дуже ефективний спосіб захисту робочих зон біля транспортної магістралі [77].

Недоліки: необхідне створення спеціальних тунелів і вагонів, що потребує великих коштів. Цей метод можна застосовувати в разі транспортування невеликих обсягів вантажу. Не виключено забруднення повітряного середовища всередині тунелю.

На підставі виконаного аналізу методів захисту навколишнього середовища від забруднення під час перевезення вугілля можна зробити такі висновки:

1. Існуючі методи захисту можна поділити на дві основні групи: фізико-хімічні (змочування вантажу водою, розчинами) та механічні (повна контейнеризація вантажу, застосування кришок, закладення щілин та ін.).

2. У науковій літературі наводиться вкрай обмежена інформація щодо кількісної оцінки ефективності застосування кожного конкретного методу захисту.

3. Наведені в публікаціях дані практично не систематизовані.

Аналітичний огляд наукових досліджень, присвячених питанню забруднення навколишнього середовища під час транспортування вугілля, показує, що на сьогодні розробка та обґрунтування методів, спрямованих на мінімізацію пилового забруднення навколишнього середовища, продовжують залишатися вкрай важливою проблемою [80 – 82].

Слід підкреслити, що в Нігерії не використовуються перераховані вище методи захисту під час транспортування вугілля залізничним транспортом,

що призводить до інтенсивного пилового забруднення навколишнього середовища в транспортних коридорах і селітебних зонах.

1.5 Аналіз методів дослідження процесу розсіювання вугільного пилу в атмосферному повітрі

Аналіз літературних джерел, присвячених досліджуваній проблемі, показав, що для вивчення процесу забруднення атмосферного повітря під час транспортування вугілля використовуються два підходи:

1. Метод фізичного моделювання (лабораторні та натурні дослідження).
2. Метод математичного моделювання.

Метод лабораторного моделювання (small-scale study) базується на дослідженнях, які виконуються в аеродинамічній трубі (рис. 1.18) або на спеціально виготовлених експериментальних стендах.



а



б

Рисунок 1.18 – Моделі вагонів перед випробуваннями в аеродинамічній трубі (Португалія, University of Coimbra) [81]: а – модель напіввагона; б – тандем моделей напіввагонів

У ході проведення лабораторних експериментів розглядаються як модель вагона або тандема вагонів, так і «частина» вантажу, яка піддається впливу повітряного потоку. Постановка й проведення лабораторних досліджень обмежуються, як правило, розглядом лише окремих питань у рамках досліджуваної проблеми, а не комплексною постановкою і аналізом

всіх тих завдань, що виникають у рамках проблеми генерування пиловиділення й розсіювання пилу в атмосферному повітрі. Це пов'язано з багатофакторністю процесу пиловиділення, великими часовими витратами на проведення лабораторних досліджень і неможливістю дуже часто забезпечити збіг критеріїв подібності для моделі й природи, зокрема, за числом Рейнольдса.

Застосування сучасного лабораторного обладнання, аеродинамічних труб пов'язане з високими матеріальними витратами. Тому дослідження в цьому напрямку підтримуються грантами найбільших енергетичних компаній або компаніями-перевізниками.

Слід зауважити, що під час дослідження процесів аеродинаміки поблизу вагона з вугіллям використовується також метод візуалізації течії (visualization test), який полягає в прикріпленні тонких смужок до об'єкта та їх фотографування під час руху повітряного потоку. Такий спосіб є більш дешевим, ніж застосування спеціального обладнання.

Дуже важливо вказати, що з огляду на багатофакторність процесу, що вивчається, дослідники, які спочатку розглядали проблему виносу вугільного пилу в натурних умовах [80], перейшли до досліджень на моделях, у лабораторних умовах [81], що дало можливість певним чином систематизувати отримані результати.

Проведення натурального експерименту (full-scale study) у рамках досліджуваної проблеми – вкрай складне завдання. Це пов'язано з багатьма факторами, а саме:

- 1) великі габарити джерел емісії вугільного пилу (комплекс вагонів);
- 2) складність вимірювання концентрації пилу одночасно в різних точках транспортного коридору;
- 3) складність аналізу результатів вимірювань (пил з вагона може не тільки виділятися під час руху потяга, але й надходити в них із сусідніх вагонів);

4) кумулятивний ефект – на величину концентрації пилу в повітряному середовищі впливає як викид з кожного вагона в потязі, так і підняття в повітря пилу з поверхні землі за рахунок руху потяга.

5) необхідність установки на вагони, у робочих зонах дорогого вимірювального обладнання, датчиків, моніторів і виконання досліджень у процесі руху потяга;

6) різноманіття реальних ситуацій з перевезення вугілля (вагони з різним ступенем зношеності, різні режими перевезення, різні прискорення, ступінь турбулентності атмосфери, зміна вологості вантажу під час транспортування тощо) – усе це значно ускладнює аналіз і систематизацію дослідних даних;

7) коливання метеоумов, наявність «зовнішніх» забруднювачів (нерегульовані параметри) під час проведення натурного експерименту і вплив таких коливань на ці досліджень;

8) необхідність виконання вимірювань протягом тривалого часу (експерименти можуть тривати кілька тижнів);

9) великі витрати часу на обробку, «фільтрацію» результатів натурних експериментів з метою їх аналізу та систематизації.

Через перелічені причини й невизначеності, які існують у науковій літературі, дані про інтенсивність емісії вугільного пилу та його винесення з напіввагонів дуже відрізняються. Наявність названих причин, що виникають у ході проведення натурного експерименту, є стимулом для розробки математичних моделей з метою оперативного отримання потрібних даних і зменшення коштів і часу на їх отримання.

Проведення натурного експерименту завжди вимагає великих часових витрат. Наприклад, у роботі [80] наведено результати натурного експерименту з визначення швидкості повітряного потоку біля напіввагонів з вугіллям і кількості вугільного пилу, яка виносилася з напіввагонів під час транспортування (рис. 1.19). Цей експеримент проводився протягом 16 днів, маршрут транспортування вугілля був майже 350 км. Проведення натурного

експерименту спонсорувала одна з найбільших в Іспанії енергетичних компаній Tejo Energia [80].

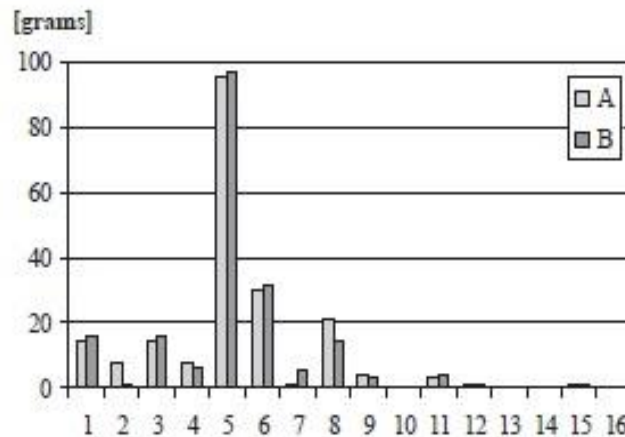


Рисунок 1.19 – Кількість вугільного пилу, винесена з напіввагона (результати натурального експерименту [80])

Необхідно вказати, що зважаючи на складність постановки натурального експерименту, значні витрати часу на його проведення, можна стверджувати, що цей метод не може бути «щоденним» інструментом у наукових дослідженнях. Тому особливої важливості набуває розробка теоретичних методів дослідження – більш економічних, оперативних та універсальних.

Також слід зауважити, що в розвинених країнах світу уздовж транспортних коридорів встановлюється спеціалізоване обладнання з оцінки концентрації вугільного пилу. Такі вимірювання виконуються в рамках моніторингу стану навколишнього середовища і пов'язані з необхідністю постійного контролю цього стану для інформування населення та мінімізації соціальної напруги в селітебних зонах, прилеглих до залізниці.

Відомо, що задача забруднення транспортних коридорів вугільним пилом з позиції математичного моделювання належить до задач масопереносу консервативної важкої домішки в атмосфері. Як відомо, для розв'язання задач, пов'язаних з розсіюванням пилу або інших забруднюючих речовин, можна використовувати балансові, аналітичні, чисельні моделі та

CFD моделі [1, 2, 5-7, 21-22, 26, 29, 32, 33-34, 42, 45, 51-52, 56, 61, 62, 66, 76, 85-86, 93-94, 97-98, 104, 108]. Однак на практиці для розрахунку забруднення атмосфери саме в разі емісії вугільного пилу на відкритому просторі використовуються два основні підходи. Перший – це застосування спеціалізованих кодів типу AERMOD, CALPUFF, Cal3QHCR, які реалізують різні варіанти моделі Гаусса [5, 22, 29, 62]. Такий підхід широко використовує одна з найавторитетніших організацій у світі, яка займається цією проблемою, – EPA (Environmental Protection Agency, США). На базі цього коду прогнозується рівень забруднення транспортних коридорів у США, Австралії, Індії. Тобто для оцінки рівня забруднення повітряного середовища транспортних коридорів застосовується аналітична модель, доповнена певними емпіричними параметрами. Модель Гаусса дозволяє швидко отримувати прогнозні дані, але водночас має істотні недоліки. Наприклад, вона не бере до уваги форму вагона, не дозволяє врахувати залежність пиловиділення з поверхні вантажу від локальної швидкості повітряного потоку. Найголовніший недолік моделі Гаусса – це те, що в ній вагон приймається як «точка». Тому ця модель не може бути використана для проведення досліджень з оцінки впливу форми вагона, форми вантажу, додаткових бортів тощо.

Другий підхід – це метод CFD досліджень на базі рівнянь аеродинаміки. Найчастіше для розв'язання аеродинамічних задач, зокрема визначення поля швидкості, застосовують рівняння Нав'є–Стокса. За кордоном цей підхід використовують значно рідше, ніж модель Гаусса. Як правило, під час проведення CFD досліджень застосовують комерційні пакети програм, наприклад «ANSYS» (рис.1.20) [66]. Для цього залучаються фахівці високої кваліфікації, які мають ліцензію на роботу з комерційним кодом. Комп'ютерний час на розв'язання одного варіанта задачі в разі використання рівнянь Нав'є–Стокса може становити від 3 діб і більше.

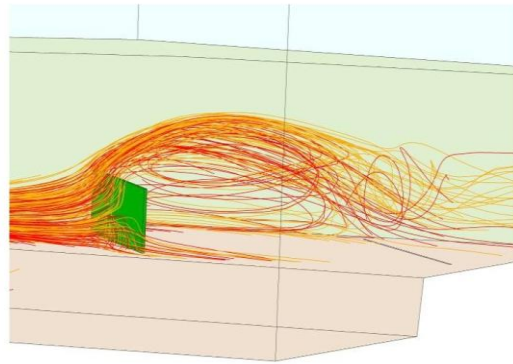


Рисунок 1.20 – Траєкторії часток домішки біля бар'єра. Розрахунок на базі комерційного коду «ANSYS» [66]

Аналіз літературних даних дозволив виділити один дуже важливий факт: під час дослідження процесу виносу вугільного пилу з вагонів за допомогою методу CFD моделювання сам процес розсіювання вугільного пилу в навколишнє середовище не моделюється, тобто автори, які використовують CFD моделювання, не розв'язують рівняння масопереносу вугільного пилу. Цей метод застосовують тільки для оцінки локального поля швидкості біля напіввагона з вугіллям і за величиною швидкості робиться висновок про те, чи буде інтенсивно виноситися вугільний пил з напіввагона [82]. Тому на підставі такого підходу [82] немає можливості прогнозувати концентрацію пилу в повітряному середовищі поблизу транспортної магістралі й тим самим кількісно оцінювати ефективність застосування різних методів захисту навколишнього середовища від пилового забруднення. Це пов'язано з тим, що для теоретичного розв'язання такої багатофакторної задачі дуже складно побудувати робочу математичну модель масопереносу.

Необхідно підкреслити, що використання відомих CFD моделей, які реалізують чисельне інтегрування рівнянь Нав'є–Стокса, разом з тією чи іншою моделлю турбулентності потребує застосування потужних комп'ютерів. Наголосимо, що застосування ліцензованих комерційних пакетів, які реалізують CFD моделі, є дуже дорогим підходом.

Математичне моделювання як самостійний метод дослідження є важливим інструментом для обґрунтування інженерних методів захисту

навколишнього середовища від забруднення вугільним пилом, оскільки дозволяє оперативно вивчити процес з урахуванням найбільш важливих факторів і при цьому не потребує таких великих коштів порівняно з фізичним експериментом.

Аналіз літературних джерел з досліджуваної проблеми показав, що в Україні та Нігерії не провадиться розробка математичних моделей для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час перевезення вугілля й практично відсутні лабораторні або натурні дослідження, присвячені цій проблемі.

1.6. Обґрунтування обраного наукового напрямку

Виконаний аналіз літературних джерел з досліджуваної проблеми дозволив встановити таке:

1. Перевезення вугілля в напіввагонах призводить до інтенсивного пилового забруднення навколишнього природного середовища.

2. У Нігерії не застосовуються методи боротьби з пиловиділенням під час перевезення вугілля, що, зокрема, пояснюється досить високою вартістю існуючих методів, які використовуються, наприклад, у США, Австралії, Португалії, та відсутністю в країні відповідного досвіду й наукових розробок.

3. У Нігерії відсутні CFD методи оцінки пилового забруднення навколишнього середовища під час перевезення вугілля.

4. У Нігерії та Україні відсутні теоретичні методи оцінки рівня забруднення навколишнього середовища під час перевезення вугілля в напіввагонах.

Таким чином, актуальним завданням є розробка ефективних і економічних методів боротьби з пиловим забрудненням навколишнього середовища під час перевезення вугілля й створення математичних моделей для оцінки рівня забруднення навколишнього природного середовища в разі використання тих чи інших методів захисту.

Висновки до розділу 1

1. Виконаний аналіз літературних джерел показав, що інтенсивність пилового забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля залежить від багатьох факторів, найважливішим з яких є швидкість повітряного середовища біля поверхні вантажу.

2. Аналіз сучасних методів мінімізації забруднення навколишнього середовища вугільним пилом виявив, що існуючі методи захисту потребують досить високих витрат, застосування додаткового обладнання на станціях навантаження (розвантаження) вугілля, витрат часу на імплементацію цих методів.

3. На основі вивчення літературних даних виявлено необхідність створення ефективних і економічних методів захисту навколишнього середовища від забруднення при перевезенні вугілля залізничним транспортом.

4. Аналіз методів дослідження процесу забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля показав, що лабораторні та натурні дослідження вимагають значних матеріальних витрат на постановку експерименту, складного обладнання та великих затрат часу на його проведення. Це створює значні труднощі при проведенні комплексних наукових досліджень з вивчення забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля.

5. Виявлено, що для теоретичної оцінки рівня забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля найбільш широко використовується спрощена модель – модель Гаусса, у якій вагон з вантажем моделюється «точкою». Це не дозволяє застосувати цю модель для оцінки ефективності розроблюваних заходів захисту при перевезенні вугілля.

6. Відсутні ефективні математичні моделі, що дозволяють оцінити рівень забруднення навколишнього середовища та ефективність застосування різних методів його захисту при транспортуванні вугілля.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ БІЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МАГІСТРАЛІ

У цьому розділі розглядаються математичні моделі, на основі яких надалі здійснюється оцінка рівня забруднення атмосферного повітря під час перевезення вугілля в напіввагонах. За допомогою цих моделей також визначається ефективність пропонованих методів захисту навколишнього природного середовища від забруднення [8-14].

Як відомо, сьогодні розробка моделей для теоретичного дослідження процесів забруднення навколишнього природного середовища виконується з урахуванням масштабу модельованого процесу (наприклад, масштаби «Canopy», «Urban» та ін.). Нижче розглядається розробка моделей для вивчення забруднення атмосферного повітря в масштабі «Microscale» і «Local». «Microscale» застосовується для оцінки рівня забруднення повітряного середовища безпосередньо біля напіввагона з вугіллям, а масштаб «Local» – для дослідження процесу забруднення атмосферного повітря на ділянці, що прилягає до транспортної магістралі.

2.1 Особливості досліджуваного явища

Моделювання розсіювання вугільного пилу під час транспортування вугілля часто розглядають з прив'язкою до конкретного транспортного коридору. Розглянемо транспортування вугілля біля станції Enugu – однієї з найбільших залізничних станцій Нігерії, через яку перевозяться корисні копалини, добуті в країні. Місто Enugu називають містом шахтарів.



Рисунок 2.1 – Залізнична станція Enugu, Нігерія (Google image)

Для транспортування вугілля в Нігерії використовуються різні напіввагони (рис. 2.2), найчастіше з корисним навантаженням 60 т. При цьому відсутні будь-які способи мінімізації пиловиділення, тобто відсутній захист від пилового забруднення атмосферного повітря біля транспортної магістралі.



Рисунок 2.2 – Вагон для транспортування вугілля
(<https://www.progressiverailroading.com/railproducts/graphics/CACO-ЮАМ-HIGH16.jpg>)

Слід також зауважити, що перевезення вугілля в Нігерії часто відбувається із завантаженням у напіввагон вантажу з «шапкою», тобто коли частина вантажу перевищує рівень бортів вагона (у зарубіжній літературі для

такого виду завантаження використовують термін «poorly loaded wagon» – «погано завантажений вагон»). За такого навантаження зона пиловиділення піддається активному впливу вітрового потоку і, як результат, відбувається інтенсивний винос вугільного пилу з напіввагона й забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні біля залізничної магістралі.

Для мінімізації рівня такого забруднення в цій роботі пропонується використовувати два методи інженерного захисту (аеродинамічний захист):

1. Установлення на вагон додаткових бортів спеціальної форми.
2. Установлення на вагоні аеродинамічного захисту – екрана.

Виділимо дві основні особливості досліджуваного процесу, які вкрай ускладнюють процес теоретичного вивчення:

1. Складна геометрична область, де відбувається емісія й перенесення вугільного пилу, що не дозволяє застосувати аналітичні моделі розсіювання домішки для оцінки рівня забруднення навколишнього середовища.

2. Залежність інтенсивності пиловиділення у вагоні від величини локальної швидкості повітряного потоку біля поверхні вантажу.

Запропоновані в цьому розділі математичні моделі та їх чисельні аналоги, наведені в третьому розділі, дозволяють врахувати вказані особливості.

2.2 Моделі оцінки рівня забруднення атмосферного повітря вугільним пилом

Процес виносу вугільного пилу з напіввагона й розсіювання його в атмосферному повітрі є багатофакторним. Для теоретичного дослідження цього процесу будемо враховувати такі фактори:

1. Геометричну форму вагона.
2. Локальну швидкість повітряного потоку та її зміну поблизу вагона з вугіллям.
3. Турбулентну дифузю.

4. Форму «шапки» вантажу у вагоні.
5. Наявність на вагоні додаткових бортів складної форми або екранів.
6. Швидкість руху вагона.
7. Залежність інтенсивності емісії вугільного пилу від локальної швидкості біля поверхні пиловиділення.

Для моделювання розсіювання вугільного пилу з напіввагона з урахуванням названих факторів будемо застосовувати рівняння масопереносу вигляду [22, 40, 42, 63]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_s)C}{\partial z} + \alpha C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i), \end{aligned} \quad (2.1)$$

де C – концентрація вугільного пилу в атмосферному повітрі;

u, v, w – компоненти вектора швидкості повітряного середовища;

w_s – швидкість гравітаційного осідання вугільного пилу;

μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;

$Q_i(t)$ – інтенсивність емісії вугільного пилу;

t – час;

$\delta(x-x(t)_i)\delta(y-y(t)_i)\delta(z-z_i)$ – дельта-функція Дірака;

x_i, y_i, z_i – координати розташування точкового джерела емісії вугільного пилу на поверхні вантажу.

Під час моделювання процесу забруднення атмосферного повітря поверхня пиловиділення в напіввагоні замінюється набором точкових джерел емісії, що задаються за допомогою дельта-функції Дірака.

Таким чином, для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря біля транспортної магістралі необхідно розв'язати рівняння (2.1) за відповідних вихідних даних.

Для урахування метеорологічних факторів, що впливають на розсіювання вугільного пилу, будемо використовувати такі залежності [21, 22]:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p, \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad (2.2)$$

де u_1 – швидкість вітрового потоку на висоті z_1 (зазвичай у розрахунках приймають $z_1=10$ м); $p = 0,16$; $k_1 = 0,2$; $m \approx 1$.

Перша залежність з (2.2) визначає зміну з висотою поздовжньої складової швидкості вітру, а друга – значення вертикального коефіцієнта атмосферної турбулентної дифузії, що змінюються з висотою (ступінь стійкості атмосфери). Значення інших коефіцієнтів дифузії визначається за такими формулами [21, 22]:

$$\begin{aligned} \mu_y &= \mu_x, \\ \mu_y &= k_0 u, \end{aligned} \quad (2.3)$$

де $k_0 = 0,1$.

Для визначення величини швидкості гравітаційного осідання пилу можна використовувати результати експериментальних досліджень або обчислити її на базі відомих залежностей.

Для отримання однозначного розв'язку крайової задачі необхідно задати граничні й початкові умови для рівняння (2.1). Це такі умови [42, 63]:

1. Там, де вітровий потік входить у розрахункову область, реалізується гранична умова вигляду [42, 63]

$$C|_{inlet} = Centrance, \quad (2.4)$$

де *Centrance* – задане значення концентрації вугільного пилу; у ході виконання обчислювального експерименту будемо вважати, що *Centrance* = 0.

На межі виходу повітряного потоку з області реалізується гранична умова вигляду [42, 63]

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0, \quad (2.5)$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до границі виходу потоку. Як відомо, така гранична умова на вихідній границі має певний фізичний зміст – нехтування дифузиею на границі розрахункової області. Зауважимо, що на цій границі наявне перенесення пилу за рахунок конвекції.

На верхній і нижній площинах розрахункової області гранична умова записується так [42, 63]:

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0,$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до поверхні. У чисельній моделі для реалізації цієї граничної умови використовуються фіктивні осередки.

Вихідна умова для досліджуваного процесу забруднення атмосферного повітря записується так:

$$C = 0 \text{ у розрахунковій області при } t = 0. \quad (2.6)$$

Зауважимо, що особливістю застосовуваного рівняння (2.1) до досліджуваних у цій роботі завдань є те, що це рівняння, на відміну від класичного варіанта, враховує рух джерела емісії (потяга) шляхом задання його координат, що залежать від часу.

Рівняння (2.1) у цій роботі буде застосовуватися у двох випадках:

- 1) при 3D CFD моделюванні процесу забруднення атмосферного повітря у разі емісії вугільного пилу з напіввагона;
- 2) при 3D моделюванні забруднення атмосферного повітря на станції під час руху потяга з вугіллям.

Крім рівняння (2.1) будемо також використовувати його двовимірний аналог (профільна задача) для дослідження процесів забруднення робочих зон біля залізничної магістралі при емісії вугільного пилу з напіввагона, що має додаткові борти складної форми або повітряну завісу. Двовимірний аналог має такий вигляд [42, 63]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \sigma C = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x(t)_i) \delta(y - y(t)_i), \quad (2.7)$$

де C – усереднене значення концентрації вугільного пилу;

u, v – усереднене значення компонент вектора швидкості повітряного потоку біля напіввагона;

$\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії;

Q_i – значення емісії вугільного пилу від точкового джерела;

t – час;

x_i, y_i – координати розташування точкового джерела емісії вугільного пилу в напіввагоні;

$\delta(x-x(t)_i), \delta(y-y(t)_i)$ – дельта-функція Дірака.

У разі практичного застосування рівняння (2.6) для розрахунку метеорологічних параметрів будуть застосовуватися такі формули [21, 22]:

$$u = u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^p, \mu_y = k_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^m, \mu_x = k_0 u, \quad (2.8)$$

Граничні умови для рівняння (2.7) записуються так:

1. Там, де вітровий потік входить у розрахункову область, реалізується гранична умова вигляду (2.4) [42, 63].

2. На границі виходу повітряного потоку з розрахункової області реалізується гранична умова вигляду (2.5).

Вихідна умова для рівняння (2.7) записується у вигляді (2.6).

Оскільки в цій роботі буде розглядатися перенесення вугільного пилу в нерівномірному повітряному потоці, то може бути отриманий тільки чисельний розв'язок розглянутих диференціальних рівнянь.

2.3 Моделювання аеродинаміки вітрового потоку при обтіканні напіввагона з вугіллям

Для адекватної оцінки рівня пилового забруднення атмосферного повітря необхідно врахувати локальну зміну поля швидкості повітряного потоку біля вагона з вантажем. Це поле швидкості повітряного потоку використовується для розв'язання рівнянь (2.1) або (2.7). Крім цього, вкрай важливо знати локальне поле швидкості біля поверхні вантажу, оскільки

виділення вугільного пилю від різних ділянок поверхні вантажу залежить від значення локальної швидкості повітряного потоку в цьому місці. Тому виникає важлива задача з розрахунку поля швидкості біля вагона з вантажем і біля поверхні вантажу.

Для розв'язання цієї задачі буде застосовуватися рівняння для потенціалу швидкості [40-41, 63]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (2.9)$$

де φ – потенціал швидкості.

Слід зауважити, що рівняння (2.9) для цієї задачі обтікання вагона з вантажем може бути розв'язано тільки чисельним шляхом.

Якщо визначено поле потенціалу швидкості, компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуються за такими формулами [41]:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (2.10)$$

Розглянемо постановку крайових умов для рівняння аеродинаміки (2.9). Це такі умови [41, 63]:

- на твердих границях (стінки вагона, поверхня вантажу, верхня, нижня границя розрахункової області й бічні грані) ставиться умова непротікання:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \quad (2.11)$$

де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до границі;

- на кордоні «виходу» потоку з розрахункової області ставиться гранична умова Діріхле вигляду $P = \text{const}$;

- на тих границях, де відбувається «втікання» повітряного потоку, ставиться гранична умова Неймана: $\frac{\partial P}{\partial n} = V$, де V – відома швидкість повітряного потоку.

Після визначення поля потенціалу швидкості й розрахунку компонент вектора швидкості вітрового потоку біля напіввагона на другому етапі моделювання розв'язується задача про перенесення пилових забруднень з напіввагона в робочу зону (розв'язання рівняння (2.1)).

У цій роботі для моделювання процесу забруднення атмосферного повітря будемо також застосовувати двовимірне рівняння для потенціалу швидкості. Моделюючим у цьому випадку є рівняння [41, 63]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (2.12)$$

де φ – потенціал швидкості, вісь Y спрямована вертикально вгору.

Компоненти вектора швидкості повітряного потоку розраховуються за залежностями [41, 63]:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}. \quad (2.13)$$

Постановка крайових умов для цього рівняння аналогічна, як і для тривимірного рівняння [41, 63].

2.4 Оцінка інтенсивності виділення вугільного пилу під час перевезення вугілля

Оцінка інтенсивності виділення вугільного пилу від поверхні вантажу є особливо важливою задачею при прогнозуванні рівня забруднення атмосферного повітря під час перевезення вугілля. Це пов'язано з тим, що інтенсивність пиловиділення прямо впливає на інтенсивність забруднення повітряного середовища. На сьогодні ця задача ще далека від розв'язання [80-81].

Аналіз літературних джерел показав, що є обмежена кількість наукових публікацій, присвячених розв'язанню цієї задачі. Дані щодо інтенсивності емісії пилу від поверхні вугілля, наведені в науковій літературі, істотно відрізняються. Наприклад, у роботі [50] вказується на інтенсивність емісії

вугільного пилу в кількості $Q = 1.0 - 6.5 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при швидкості повітряного потоку майже $3 - 5 \text{ м}/\text{с}$ і порядку $Q = 9 \text{ мг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при швидкості повітряного потоку $7 - 8.5 \text{ м}/\text{с}$. З іншого боку, у роботі [77] відзначається інтенсивність емісії в кількості $Q = 0.044 - 0.44 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ при швидкості повітряного потоку приблизно $6 - 10 \text{ м}/\text{с}$. Під час перевезення вугілля залізничним транспортом, згідно з експериментальним дослідженням [80], його втрати становлять приблизно $0.05\% - 1\%$ від маси вантажу, у той час як у роботі [82] вказується, що такі втрати можуть дорівнювати порядку $0.5\% - 3\%$ маси вантажу.

Слід зауважити, що дані, наведені в науковій літературі щодо маси вугілля, яке губиться під час перевезення залізничним транспортом, також суттєво відрізняються в різних наукових дослідженнях. Це пов'язано з тим, що експериментальні дослідження виконуються для різних марок вугілля, за різних умов експерименту. Безумовно, особливо складною проблемою є теоретична оцінка інтенсивності пиловиділення.

Аналіз літературних джерел з цієї проблеми дозволив встановити таке:

1. Основним методом дослідження процесу пиловиділення є метод фізичного моделювання – лабораторні дослідження або натурний експеримент (наприклад, на рис. 2.3 показана схема дослідної установки (Нідерланди) з вивчення процесу виносу вугільного пилу від зразка [84]. Ця установка містить вентилятор (фен) для подачі повітряного струменя на дослідний зразок вугільного насипу й обладнання для збору пилу).

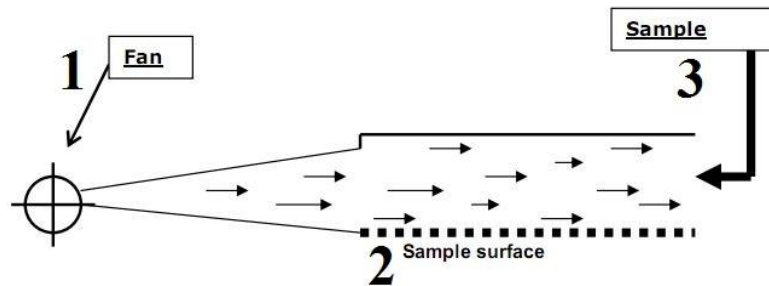
2. Фізичні експерименти проводяться в різних умовах: для різних марок вугілля (нерідко в наукових публікаціях ця інформація не деталізується); для різних умов транспортування (різний рельєф місцевості, нерівномірна швидкість руху потяга тощо); за різних атмосферних умов (вологість атмосферного повітря, інсоляція тощо). З цієї причини значення інтенсивності емісії вугільного пилу, що наводиться в наукових публікаціях, чисельно дуже відрізняється.

3. Результати фізичних експериментів піддаються математичній обробці й на основі цього отримують емпіричні або регресивні моделі для

розрахунку інтенсивності емісії вугільного пилу. Сфера застосування таких моделей обмежується умовами проведення експерименту.

4. Отримані моделі враховують обмежену кількість фізичних факторів, що впливають на інтенсивність процесу пиловиділення (наприклад, тільки швидкість повітряного потоку або швидкість повітряного потоку + вологість + маса вугілля і т.д.). Вибір цих факторів не завжди конкретно обґрунтовується авторами досліджень.

5. У літературі відсутні систематизовані дані, моделі з оцінки інтенсивності емісії вугільного пилу залежно від різних факторів (локальна швидкість повітряного потоку, вологість тощо)



1 – повітродувка (фен); 2 – дослідний зразок вугілля; 3 – обладнання для збору пилу, що здувається

Рисунок 2.3 – Схема лабораторної установки з вивчення інтенсивності виносу вугільного пилу від дослідного зразка [84]

Так, однією з найбільш «повних» емпіричних моделей для розрахунку інтенсивності емісії вугільного пилу з напіввагона є така залежність [25]:

$$Q = \rho \cdot V_B \cdot S \cdot t \cdot \left(0,10837 \cdot \frac{\rho \cdot V_B^2}{\rho_{OB}} + 0,1703 \cdot \frac{j_B}{g} - 0,3217 \cdot \omega - 0,3546 \right) \cdot 10^{-2}, \quad (2.14)$$

де Q – втрати вугілля під час транспортування; ρ – густина повітря; V_B – швидкість повітря поблизу обтічної поверхні (локальна швидкість); S – площа поверхні, з якої видувається вантаж; t – тривалість процесу видування вантажу; ρ_{OB} – об'ємна маса вантажу; d – середній діаметр частинок вантажу;

J_B – прискорення вертикальних коливань вагона; g – прискорення вільного падіння; ω – вологість повітря.

Слід підкреслити, що існують й інші емпіричні моделі для розв'язання цієї задачі. На жаль, немає можливості тут навести закордонні моделі для оцінки інтенсивності емісії вугільного пилу через заборону авторами цих робіт на відтворення матеріалів з їхніх публікацій.

Аналіз моделей, що використовуються для оцінки інтенсивності емісії вугільного пилу, дозволяє зробити такі висновки:

1. Моделі враховують обмежену кількість фізичних факторів, що визначають інтенсивність процесу пиловиділення.

2. З попереднього висновку випливає, що результати, отримані на основі застосування різних моделей за оцінкою інтенсивності пиловиділення, можуть не збігатися один з одним.

3. Невідповідність розрахункових даних, отриманих за допомогою різних моделей, також буде зумовлена тим, що різні моделі отримані за різних умов експерименту.

4. Немає універсальної моделі для оцінки інтенсивності пиловиділення.

Таким чином, оцінка інтенсивності пиловиділення залишається важливою науковою проблемою.

Висновки до розділу 2

1. Для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час транспортування вугілля в напіввагонах запропоновано використовувати багатовимірне диференціальне рівняння масопереносу, яке є фундаментальним рівнянням механіки суцільного середовища.

2. Розрахунок пилового забруднення атмосферного повітря на базі запропонованого рівняння масопереносу дозволяє отримувати інформацію про формування поля концентрації вугільного пилу в усій досліджуваній області, а не лише в деякій точці навколишнього середовища.

3. Застосування моделі аеродинаміки повітряного потоку дозволяє визначити поле швидкості потоку біля вагона з вугіллям. Це дає можливість адекватно прогнозувати рівень пилового забруднення атмосферного повітря за рахунок урахування інтенсивності емісії від локального значення швидкості й геометричної форми вагона.

4. Застосування багатовимірного масопереносу разом з рівнянням аеродинаміки дозволяє вперше прогнозувати рівень пилового забруднення з урахуванням комплексу основних фізичних факторів, що впливають на рівень забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля, а саме: швидкості повітряного потоку біля поверхні вантажу, інтенсивності емісії вугільного пилу, дифузії вугільного пилу, швидкості руху вагона з вугіллям.

5. Реалізація запропонованих у розділі моделей може бути виконана на базі стандартної інформації: швидкість руху потяга, швидкість вітру, параметри емісії, форма вагона, форма вантажу в напіввагоні.

РОЗДІЛ 3

ПОБУДОВА ЧИСЕЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ

У цьому розділі розглянуто побудову чисельних моделей для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час перевезення вугілля [15-20, 47-49, 71-73, 91]. Зауважимо, що чисельна модель – це поєднання таких елементів: диференціальні рівняння, що моделюють процес, різницеві схеми та код (програма).

3.1 Формування виду розрахункової області

Як уже зазначалося раніше, дослідження пилового забруднення атмосферного повітря будемо виконувати в масштабах:

1. «Microscale» (масштаб перенесення домішки в атмосфері на відстані декількох метрів – біля напіввагона);

2. «Local» (масштаб перенесення домішки в атмосфері на відстані майже декількох десятків метрів – у разі проходження потяга з вугіллям через селітебну зону).

У разі використання масштабу «Microscale» обов'язковою вимогою є врахування геометричної форми напіввагона, що дуже ускладнює завдання побудови чисельної моделі. Це пов'язано з тим, що в цьому випадку розрахункова область має дуже складну геометричну форму, відмінну від канонічної, наприклад прямокутну. У середині розрахункової області розташовано вагон, що має певну форму, вантаж, що також має складну геометричну форму, крім цього, формується нерівномірне поле швидкості вітрового потоку біля поверхні вантажу.

Основою отримання інформації про інтенсивність забруднення атмосферного повітря при теоретичному вирішенні завдання є розв'язання моделюючих диференціальних рівнянь, які розглянуті в другому розділі. Це

можна виконати тільки чисельним шляхом. У цій роботі для розв'язання моделюючих рівнянь будемо застосовувати скінченно-різницеві методи. Суть їх полягає в переході від диференціальних рівнянь до алгебраїчних співвідношень, за допомогою яких можна знайти значення невідомих функцій (концентрації пилу в атмосферному повітрі, компонент вектора швидкості повітряного середовища). Сукупність таких співвідношень, які потім програмуються, утворює чисельну модель досліджуваного процесу.

Розв'язання моделюючих рівнянь виконується з використанням прямокутної різницевої сітки (рис. 3.1, 3.2). Для формування зовнішніх і внутрішніх границь розрахункової області, виділення особливостей всередині розрахункової області буде використовуватися метод маркування, який іноді називають методом «porosity technique» [63]. За допомогою маркерів задається положення залізничного вагона, його форма, форма «насипу» сипучого вантажу в напіввагоні (рис.3.1, 3.2).

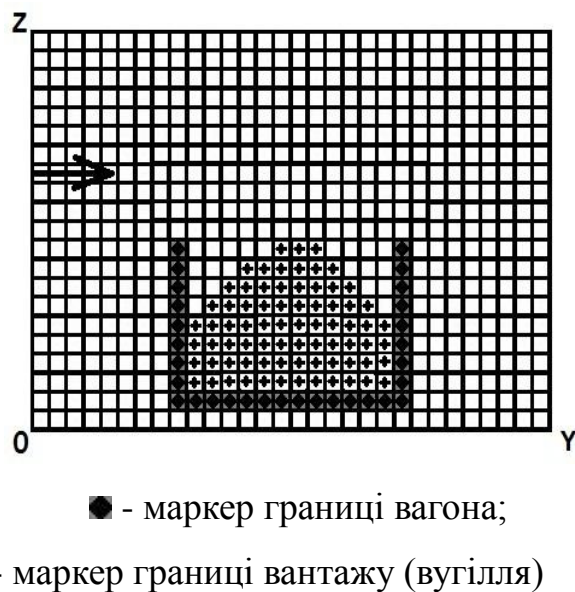
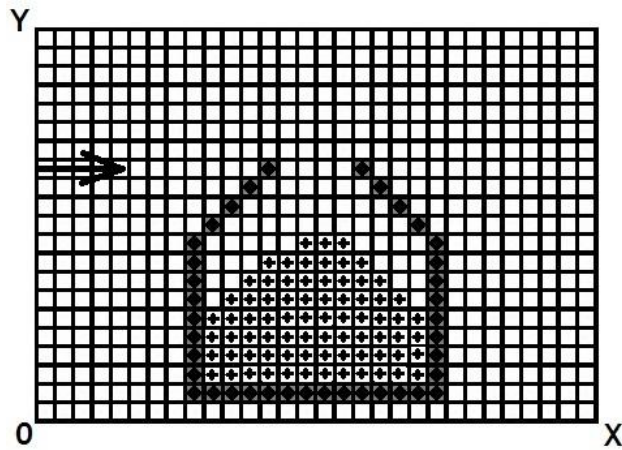


Рисунок 3.1 – Принцип маркування розрахункової області на різницевій сітці в 3D чисельній моделі, переріз $x = \text{const}$



● - маркер границі вагона;

+ - маркер границі вантажу (вугілля)

Рисунок 3.2 – Принцип маркування 2D розрахункової області на різницевій сітці (задання форми вагона з бортом типу «крило»)

Місце емісії вугільного пилу від насипу в напіввагоні також задається за допомогою маркерів.

Застосування методу маркування дає можливість:

1. Швидко формувати форму напіввагона в чисельній моделі.
2. Швидко формувати форму «шапки» вантажу в чисельній моделі.
3. Швидко формувати форму додаткових бортів (або екрана), які застосовуються для зменшення інтенсивності забруднення атмосферного повітря.
4. Враховувати під час розрахунку вплив геометричної форми шапки вантажу на формування локального поля швидкості повітряного потоку, а отже, неоднорідність емісії вугільного пилу від різних ділянок вантажу.

3.2 Чисельний розв'язок рівняння розсіювання вугільного пилу в атмосферному повітрі

Розглянемо побудову чисельної моделі для розрахунку концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі на базі тривимірного рівняння (2.1). Перед чисельним розв'язанням рівняння (2.1) зробимо його розщеплення на диференціальному рівні таким чином [42, 63]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial(w-w_s)C}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \sum Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Для зручності викладу побудови різницевої схеми введемо позначення $w = w - w_s$.

Зауважимо, що з позиції фізики перше рівняння із системи (3.1) описує перенесення вугільного пилу по траєкторіях, друге рівняння – перенесення внаслідок дифузії, а третє – зміну концентрації пилу за рахунок дії джерел її емісії. Виконаємо апроксимацію похідних, що входять у систему (3.1). Наголосимо, що функція C визначається в центрі контрольних обсягів (осередках), компоненти вектора швидкості повітряного середовища визначені на гранях контрольного обсягу (ці параметри визначаються після розв'язання задачі аеродинаміки).

Розглянемо апроксимацію похідних у моделюючих рівняннях. Конвективні похідні запишемо так [63]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial uC}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial vC}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ \frac{\partial wC}{\partial z} &= \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}, \end{aligned}$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; v^+ = \frac{v + |v|}{2}; v^- = \frac{v - |v|}{2}; w^+ = \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

Конвективні похідні апроксимуємо розділеними різницями проти потоку [63]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j,k}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial w^+ C}{\partial z} &\approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial w^- C}{\partial z} &\approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1},\end{aligned}$$

де L_x^+ , L_y^+ , L_z^+ , L_x^- , L_y^- , L_z^- – позначення різницевих операторів.

Для апроксимації других похідних використовуємо такі формули [63]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} - \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.\end{aligned}$$

Похідна за часом записується так: $\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{i,j}^{n+1} - C_{i,j}^n}{\Delta t}$.

На часовому інтервалі dt буде здійснювати послідовне розв'язання рівнянь із системи (3.1) з урахуванням розглянутих різницевих аналогів. Спочатку розв'язуємо перше рівняння із системи (3.1). Для цього виконаємо розщеплення цього рівняння в різницевої вигляді таким чином [63]:

– на першому кроці $k = n + \frac{1}{4}$ різницеве рівняння записується так:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k) = 0.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно невідомого значення концентрації пилу на верхньому часовому шарі, отримуємо розрахункову формулу

$$C_{i,j,k}^k = C_{i,j,k}^n - \frac{\Delta t}{2}(L_x^+ C^k + L_y^+ C^k + L_z^+ C^k); \quad (3.2)$$

– на другому кроці $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$ різницеве рівняння записується так:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) = 0.$$

Розв'язуючи це рівняння відносно значення концентрації на верхньому часовому шарі, отримуємо розрахункову формулу:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) = 0; \quad (3.3)$$

– на третьому кроці $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$ використовується формула (3.3);

– на четвертому кроці $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$ застосовується формула (3.2).

Наведена різницева схема (формули (3.2), (3.3)) називається змінно-трикутною неявною різницевою схемою розщеплення.

Далі розв'язуємо друге рівняння із системи (3.1) (рівняння дифузійного переносу пилу). Для цього виконуємо розщеплення цього рівняння на два кроки (різницева схема сумарної апроксимації) [58]:

- на першому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд:

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

Розв'язуючи його відносно значення концентрації на верхньому часовому шарі, отримуємо розрахункову формулу:

$$C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} = C_{i,j,k}^n + \Delta t \left(\left[\mu_x \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i-1,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j-1,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right] + \left[\mu_z \frac{-C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + C_{i,j,k-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta z^2} \right] \right). \quad (3.4)$$

На другому кроці розщеплення різницеве рівняння має вигляд

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \left[\mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} \right],$$

Розв'язуючи це рівняння відносно значення концентрації на верхньому часовому шарі, отримуємо розрахункову формулу

$$C_{i,j,k}^{n+1} = C_{i,j,k}^{n+\frac{1}{2}} + \Delta t \left(\mu_x \left[\frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \mu_y \left[\frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} \right] + \mu_z \left[\frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} \right] \right). \quad (3.5)$$

На наступному етапі розв'язуємо третє рівняння із системи (3.1). Це рівняння апроксимуємо так:

$$\frac{C_{ijk}^{n+1} - C_{ijk}^{n+A}}{\Delta t} = \sum Q_{ijk}(t) \delta_l(x - x_i(t)) \delta_l(y - y_i(t)) \delta_l(z - z_i).$$

Тут C_{ijk}^{n+A} – значення шуканої величини на попередньому часовому шарі. Розв'язуючи це рівняння щодо значення концентрації на верхньому часовому шарі, отримуємо розрахункову формулу

$$C_{ijk}^{n+1} = C_{ijk}^{n+A} + \Delta t \sum Q_{ijk}(t) \delta_l(x - x_i(t)) \delta_l(y - y_i(t)) \delta_l(z - z_i). \quad (3.6)$$

Слід підкреслити, що під час розв'язання рівняння (3.6) використовується таке значення величини емісії

$$Q_{ijk} = Q_k / \Delta x / \Delta y / z,$$

де Q_k – відома величина точкового джерела емісії пилу від ділянки обдуваної поверхні.

Таким чином, розв'язання задачі з визначення концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі зводиться до послідовного розрахунку цієї концентрації за різницевиими формулами (3.2) - (3.6). Ці формули мають просту структуру, не містять складних або табличних функцій тощо.

Початкова умова для кожного різницевого рівняння записується так:

$$C^1| = C(x, y, t^n), \quad C^k| = C^{k-1}|.$$

На твердих стінках для реалізації граничної умови вигляду

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$$

застосовуються «фіктивні» комірки [18, 63].

Перейдемо до розгляду чисельної моделі для розрахунку рівня забруднення атмосферного повітря на базі двовимірного рівняння переносу вугільного пилу (2.7). Для розв'язання цього завдання будемо використовувати неявну змінно-трикутну різницеву схему розщеплення [18, 63]. Побудова чисельної моделі здійснюється шляхом застосування такої процедури.

Конвективні похідні записуються так [18, 63]:

$$\frac{\partial u C}{\partial x} = \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \quad \frac{\partial v C}{\partial y} = \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y},$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}; \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Апроксимація цих похідних здійснюється за формулами [18, 63]:

$$\frac{\partial u^+ C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ C_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial u^- C}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^- C_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^+ C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ C_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial v^- C}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^- C_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- C_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}.$$

Похідну за часом апроксимуємо так:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Для апроксимації других похідних використовуємо формули [18, 63]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \tilde{\mu}_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \tilde{\mu}_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}. \end{aligned}$$

Запишемо двовимірне рівняння переносу пилу в різницевому вигляді [18, 63]:

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} = \\ = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1}) + Q_{ij} \delta_{ij}. \end{aligned} \quad (3.7)$$

У цьому рівнянні символ δ_{ij} позначає число "1" або "0", залежно від того, міститься чи ні в різницевій комірці "ij" джерело викиду пилу. Величина Q_{ij} розраховується так:

$$Q_{ij} = Q_k / \Delta x / \Delta y,$$

де Q_k – інтенсивності викиду k -го точкового джерела емісії пилу, яке розташоване в різницевій комірці "ij".

Виконаємо розщеплення різницевого рівняння (3.7) таким чином [18, 63]:

– на першому кроці розщеплення $k = \frac{1}{4}$ різницеве рівняння має

вигляд

$$\begin{aligned} \frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (3.8)$$

– на другому кроці розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$ різницеве

рівняння має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (3.9)$$

– на третьому кроці розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$ різницеве рівняння має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ C^k + L_y^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^c + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^c) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l; \end{aligned} \quad (3.10)$$

– на четвертому етапі розщеплення $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$ різницеве рівняння має вигляд

$$\begin{aligned} & \frac{C_{ij}^k - C_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- C^k + L_y^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^c + M_{yy}^- C^c + M_{yy}^+ C^k) + \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l. \end{aligned} \quad (3.11)$$

З рівнянь (3.8)-(3.11) невідоме значення концентрації пилу на верхньому часовому шарі визначається за явною формулою біжучого рахунку [42, 58, 63]. Початкова умова для цих рівнянь записується у вигляді

$$C^1 \Big| = C(x, y, t^n), \quad C^k \Big| = C^{k-1} \Big|.$$

Щоб реалізувати граничну умову на твердих стінках вигляду

$$\frac{\partial C}{\partial n} = 0$$

застосовуються фіктивні комірки.

На закінчення зауважимо, що застосовані різницеві схеми мають важливу перевагу: розрахунок невідомого значення концентрації пилу в робочій зоні здійснюється за явними формулами, які мають просту програмну реалізацію.

3.3 Чисельний розв'язок задачі з визначення швидкості повітряного потоку

Для визначення поля швидкості в разі обтікання напіввагона з вугіллям використовується рівняння для потенціалу швидкості. Для чисельного інтегрування цього рівняння застосовується метод сумарної апроксимації [58]. Якщо розглядати двовимірне рівняння для потенціалу швидкості, то спочатку воно записується в еволюційному вигляді [58]

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (3.12)$$

тут t – фіктивний час.

Відомо, що при $t \rightarrow \infty$ розв'язок цього рівняння буде прямувати до розв'язку рівняння Лапласа для потенціалу швидкості. При чисельному розв'язанні рівняння (3.12) необхідно задати поле потенціалу при $t = 0$.

Наприклад, перед початком розрахунку можна прийняти $P = 0$ у всій розрахунковій області для $t = 0$.

Розв'язання рівняння (3.12) виконується на прямокутній сітці, функція P визначається в центрі різницевих комірок. Розв'язання цього рівняння розщеплюється на два кроки. Різницеві рівняння на кожному кроці записуються так:

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

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

На кожному кроці розщеплення невідоме значення потенціалу швидкості визначається за явною формулою біжучого рахунку. Розрахунок припиняється у разі виконання умови

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon, \quad (3.13)$$

де ε – мале число (наприклад, $\varepsilon = 0.001$); n – номер ітерації.

Після визначення поля потенціалу швидкості розраховуються компоненти вектора швидкості повітряного середовища за залежностями

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

Компоненти вектора швидкості повітряного середовища розраховуються на гранях різницевих комірок (контрольних обсягів), що дозволяє побудувати консервативну різницеву схему для рівняння переносу пилу.

Для розв'язання тривимірного рівняння для потенціалу швидкості використовується метод Річардсона [55]. Для цього вихідне рівняння для потенціалу швидкості попередньо зводиться до еволюційного вигляду:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2}, \quad (3.14)$$

де t – фіктивний час.

Далі здійснюється апроксимація похідних і розрахунок невідомого значення потенціалу швидкості на новій ітерації зводиться до розрахунку за формулою [55]

$$\begin{aligned} P_{ijk}^{n+1} = & P_{ijk}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ & + \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ & + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \end{aligned}$$

На основі цієї залежності здійснюється розрахунок значення потенціалу швидкості в комірках, відповідних області повітряного потоку. Розрахунок зупиняється у разі виконання умови

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon,$$

де ε – мале число; n – номер ітерації (кількість кроків за «часом»).

Для реалізації граничної умови непротікання використовуються фіктивні різницеві комірки. Після визначення поля потенціалу швидкості здійснюється розрахунок компоненти вектора швидкості на гранях різницевих комірок. Для цього застосовуються такі формули:

$$u_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x}, v_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y}, w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z} \quad (3.15)$$

Крім розглянутого методу Річардсона будемо також застосовувати метод Лібмана [55]. Попередньо здійснюється така апроксимація похідних:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P_{i+1,j,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i-1,j,k}}{\Delta x^2}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = \frac{P_{i,j+1,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j-1,k}}{\Delta y^2}$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial z^2} = \frac{P_{i,j,k+1} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j,k-1}}{\Delta z^2}$$

де $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ – крок різницевої сітки в напрямку OX, OY, OZ відповідно.

З огляду на це, у різницевому вигляді рівняння Лапласа можна записати так:

$$\frac{P_{i+1,j,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1} - 2P_{i,j,k} + P_{i,j,k-1}}{\Delta z^2} = 0$$

Звідси можна визначити шукану величину $P_{i,j,k}$ у кожній різницевій комірці:

$$P_{i,j,k} = \frac{\frac{P_{i+1,j,k} - P_{i-1,j,k}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j-1,k}}{\Delta y^2} + \frac{P_{i,j,k+1} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z^2}}{A},$$

$$\text{де } A = \left(\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2} + \frac{2}{\Delta z^2} \right).$$

Розрахунок за цією формулою припиняється в разі виконання умови

$$|P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n| \leq \varepsilon,$$

де n – номер ітерації (кількість кроків за «часом»); ε – мале число.

Після розрахунку поля потенціалу швидкості виконується розрахунок компонент вектора швидкості повітряного середовища за формулами (3.4).

3.4 Розробка пакетів програм для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря

На базі розглянутих різницевих схем розроблені:

1) пакет програм (generic код) «Coal Dust Dispersion-A» – для розрахунку забруднення атмосферного повітря на базі тривимірних рівнянь аеродинаміки й масопереносу (масштаб «Microscale» і «Local»);

2) пакет програм «Coal Dust Dispersion -B» – для розрахунку забруднення атмосферного повітря на базі двовимірних рівнянь масопереносу й аеродинаміки (масштаб «Microscale»).

Пакети програм написані алгоритмічною мовою FORTRAN.

Перш ніж перейти до опису розроблених кодів, наведемо опис алгоритму розв'язання задачі з оцінки рівня забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля. Алгоритм розв'язання складається з декількох етапів:

- *Перший етап:* формування бази даних для моделювання.

На цьому етапі користувач синтезує вхідні дані для чисельного моделювання, наприклад: розміри розрахункової області, форму вагона, розміри вагона, форму додаткових бортів, їх розміри та ін.

- *Другий етап:* уведення даних.

На цьому етапі користувач вносить за допомогою клавіатури вхідні дані у файл вихідних даних.

- *Третій етап:* розрахунок.

На цьому етапі користувач здійснює запуск моделюючого коду (наприклад, коду «Coal Dust Dispersion-A») і відбувається чисельне розв'язання задачі аеродинаміки й масопереносу. У результаті розв'язання визначається поле швидкості повітряного потоку в розрахунковій області, поле концентрації вугільного пилу.

- *Четвертий етап:* аналіз даних моделювання.

На цьому етапі користувач виводить на друк або на екран монітора результати чисельного моделювання для оцінки рівня забруднення повітряного середовища.

- *П'ятий етап:* коригування вхідних даних для виконання нового розрахунку.

На цьому етапі користувач здійснює необхідне коригування у файлі вихідних даних (наприклад, змінює форму додаткових бортів) і розрахунок повторюється заново.

Розглянемо структуру моделюючих кодів.

Структура коду «Coal Dust Dispersion-A»:

- 1) підпрограма «POTSP» – розв'язання рівняння для потенціалу швидкості;
- 2) підпрограма «SPCAL» – розрахунок поля швидкості повітряного потоку;
- 3) підпрограма «DUST» – розв'язання рівняння масопереносу (розрахунок концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі);
- 4) підпрограма «HQCAL» – розрахунок коефіцієнта небезпеки;
- 5) підпрограма «CONCD» – побудова концентраційного поля для візуалізації зон забруднення.

DuS – файл уведення даних.

Функціональні особливості коду «Coal Dust Dispersion-A»:

1. Можливість розрахунку просторового розподілу концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі.
2. Можливість прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря за різних умов стабільності атмосфери.
3. Можливість прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря з урахуванням гравітаційного осідання вугільного пилу.
4. Можливість прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря з урахуванням форми вагона.

5. Можливість прогнозу рівня забруднення атмосферного повітря в селітебній зоні.

6. Можливість обліку інтенсивності емісії вугільного пилу в напіввагоні від величини локальної швидкості повітряного потоку.

Час розрахунку одного варіанта завдання на базі цього коду становить приблизно 10-15 с.

Структура коду «Coal Dust Dispersion-B»:

- 1) підпрограма «POTS2» – розв’язання рівняння для потенціалу швидкості;
- 2) підпрограма «SPCA2» – розрахунок поля швидкості повітряного потоку;
- 3) підпрограма «DS2» – розв’язання рівняння масопереносу (розрахунок концентрації вугільного пилу в повітряному середовищі);
- 4) підпрограма «HQCA2» – розрахунок коефіцієнта небезпеки;
- 5) підпрограма «CONC» – побудова концентраційного поля для візуалізації зон забруднення;

DuS2 – файл уведення даних.

Функціональні особливості коду «Coal Dust Dispersion-B» такі самі, як і для коду «Coal Dust Dispersion-A».

Час розрахунку одного варіанта завдання на базі цього коду становить приблизно 3 с.

Результати тестування побудованих чисельних моделей наведено в додатку А.

Висновки до розділу 3

1. Запропоновані в розділі 2 рівняння для оцінки рівня пилового забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля враховують найбільш суттєві фізичні фактори, що обумовлюють розсіювання вугільного пилу з напіввагонів, але ці моделі допускають лише чисельне розв’язання. Тому на практиці дуже важливо створення таких чисельних моделей на базі

моделюючих рівнянь, які малі би стійкість при проведенні параметричних досліджень виносу вугільного пилу з напіввагона.

2. Наведено різницеві схеми, які використовуються для чисельного розв'язання рівняння, що описує поширення вугільного пилу в атмосферному повітрі. Важливою особливістю цих різницевих схем є те, що розв'язання задачі зводиться до послідовного розв'язування рівнянь простої структури за явною формулою. Такий підхід забезпечує просту програмну реалізацію чисельних моделей.

3. Наведено опис різницевих схем, які використовуються для розрахунку поля потенціалу швидкості й швидкості повітряного потоку біля напіввагонів з вугіллям. Застосування цих різницевих схем зводиться до послідовного розв'язування рівнянь простої структури, що дозволяє здійснити просту програмну реалізацію різницевих операторів.

4. На базі розглянутих різницевих схем розроблено комп'ютерні програми для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря під час транспортування вугілля в напіввагонах. Ці програми дозволяють проводити дослідження процесу забруднення атмосферного повітря в режимі реального часу. Гнучкість роботи пакетів програм базується на застосуванні модульного принципу під час їх розробки.

5. Створені чисельні моделі та комп'ютерні програми являють собою новий інструмент параметричного дослідження процесу забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля в напіввагонах.

6. Розроблені чисельні моделі та створені на їх базі комп'ютерні програми враховують дуже суттєві фізичні фактори, що не беруться до уваги в методикі ОНД-86, яка використовується в наступний час як основний інструмент дослідження рівня забруднення атмосферного повітря при техногенних викидах.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АЕРОДИНАМІЧНИХ МЕТОДІВ ЗАХИСТУ ВІД ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ В НАПІВВАГОНАХ

У цьому розділі наведено результати досліджень ефективності застосування додаткових бортів і екрана для захисту атмосферного повітря від забруднення під час перевезення вугілля. При організації процесу досліджень брався до уваги досвід світових лідерів в галузі охорони навколишнього середовища під час транспортування вугілля у вагонах [65, 80-82, 84].

4.1 Дослідження інтенсивності виносу вугільного пилу

У лабораторії кафедри «Гідравліка та водопостачання» Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна було виконано комплекс лабораторних експериментів з аналізу інтенсивності виносу вугільного пилу під час перевезення вугілля у напіввагонах. Спираючись на досвід фахівців, що займаються цією проблемою [80-81, 84], дослідження виконувалися на моделях напіввагона (рис. 4.4).

Метою лабораторних досліджень була перевірка робочих гіпотез щодо можливості зниження рівня забруднення навколишнього середовища за рахунок застосування в напіввагонах спеціальних додаткових бортів або екранів.

Експерименти проводилися кількома етапами. У цьому розділі наведено результати першого етапу досліджень – аналіз інтенсивності виносу вугілля від дослідного майданчика. Мета такого дослідження – визначення інтенсивності емісії (emission rate) від одиничної площі залежно від швидкості повітряного потоку. Ці дані згодом були використані для

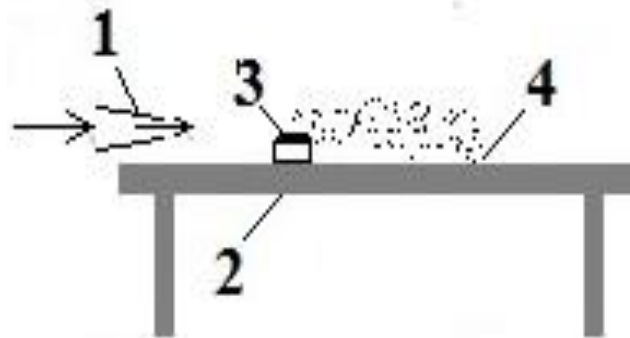
визначення інтенсивності емісії вугілля під час проведення обчислювальних експериментів.

Для проведення лабораторних досліджень використовувався вугілля з Междуреченської ЦЗФ (вологість 4,6%). Гранулометричний склад цього вугілля показаний у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Гранулометричний склад вугілля

> 5 мм	5–3,15 мм	3,15–0,5 мм	0,5–0,25 мм	0,25– 0,125 мм	0,125–0 мм
3–6%	4,5–11,25 %	21,5–53,75 %	5,0–12,8 %	3,5–8,75 %	5,5–13,75%

Схема дослідної установки наведена на рис. 4.1.



1 – повітродувка; 2 – стіл; 3 – модель напіввагона з вугіллям; 4 – зона осідання вугілля

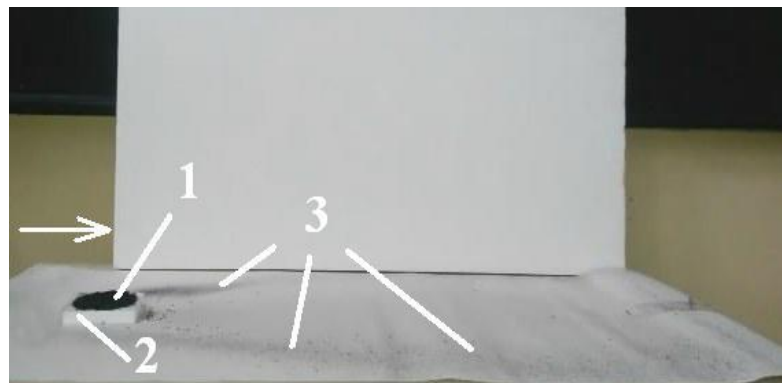
Рисунок 4.1 – Схема дослідної установки

Експерименти проводилися за температури повітря 29 °С–30 °С, відносна вологість становила приблизно 26 %. Перед проведенням експерименту зразки вугілля були покладені в сушильні шафи марки 2В-151 на 3 години і перебували там при температурі 40 °С. Метою цього була мінімізація вологості дослідних зразків вугілля, щоб наблизити умови експерименту до умов Нігерії (середньорічна температура в країні становить

порядку 32 °С). Оскільки вагони з вугіллям протягом кількох годин можуть не транспортуватися, поки йде навантаження й формування складу, то вантаж у напіввагонах перебуває досить довго в умовах прямого сонячного, теплового впливу, що призводить до низької його вологості. За умови продовження транспортування вологість ще більше буде зменшуватися.

На першому етапі досліджень здійснювалося обдування майданчика з вугіллям розміром 5 см×5 см (рис. 4.2). Експеримент проводився для діапазону швидкості повітряного потоку: 0.6 м/с – 14.3м/с. Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовувався анемометр GM 8908. Після закінчення продувки (5 хв) здійснювався збір та зважування винесеного вугільного пилу.

Результати фізичного експерименту наведено нижче. На рис. 4.2 показано зону забруднення, яка сформувалася біля майданчика.



1 – вугілля; 2 – дослідний майданчик; 3 – зона забруднення

Рисунок 4.2 – Винос вугільного пилу з дослідного майданчика

Отримані експериментальні дані використовувались для побудови графічної залежності $Q = f(V)$ (Q – маса вугільного пилу, що винесена з одиничної поверхні за одиницю часу, V – швидкість повітряного потоку). Далі графічна залежність $Q = f(V)$ була апроксимована так:

$$Q = 4.2 * (V - V_{th}), \text{ мг/(м}^2\text{с)},$$

де V – швидкість повітряного потоку, м/с, V_{th} – «порогове» значення швидкості, після якого починається відрив часток (дослідне значення цієї величини $V_{th}=1.58\text{м/с.}$)

Дана емпірична модель використовувалась під час проведення обчислювальних експериментів, коли ставилося завдання розрахувати в інтенсивність виносу вугільного пилу від різних ділянок поверхні вантажу в напіввагоні.

4.2 Дослідження забруднення атмосферного повітря в разі завантаження вугілля з «шапкою» у напіввагон

На другому етапі досліджень вивчалось питання виносу вугілля з моделі напіввагона в разі завантаження його з «шапкою», оскільки в Нігерії таке транспортування вугілля є дуже поширеним (рис. 4.3). Такий спосіб вважається вкрай негативним для навколишнього природного середовища, оскільки значна площа поверхні вантажу піддається впливу повітряного потоку, отже, відбувається інтенсивний винос пилу з напіввагона.



Рисунок 4.3 – «Шапка» вантажу перевищує висоту борту напіввагона [89]

Під час досліджень як базовий був обраний напіввагон марки 12-1592. Довжина напіввагона 12 800 мм, висота – 3 474 мм, ширина – 3 134 мм. Фізична модель напіввагона була виконана в масштабі 1:100 (рис. 4.4). У ході експериментів число Рейнольдса становило 10^4 - 10^5 (як характерний лінійний масштаб обрана довжина вагона, швидкість набігаючого

повітряного потоку). Максимальне перевищення шапки вугілля в моделі вагону було 7мм. Температура повітря 30 °С.

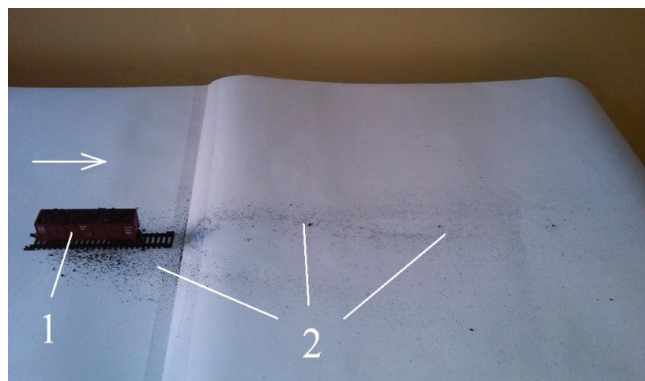


Рисунок 4.4 – Модель напіввагона з вугіллям (завантаження з «шапкою»)

Під час проведення досліджень вимірювалися:

1. Маса вугілля, винесена з моделі напіввагона після закінчення продувки.
2. Розміри області забруднення.
3. Концентрація пилу (PM2.5) на певній відстані від моделі.

На рис. 4.5 наведено фото області забруднення біля моделі напіввагона в разі завантаження його з «шапкою» (швидкість повітряного потоку:13.6 м/с – 14.3м/с).

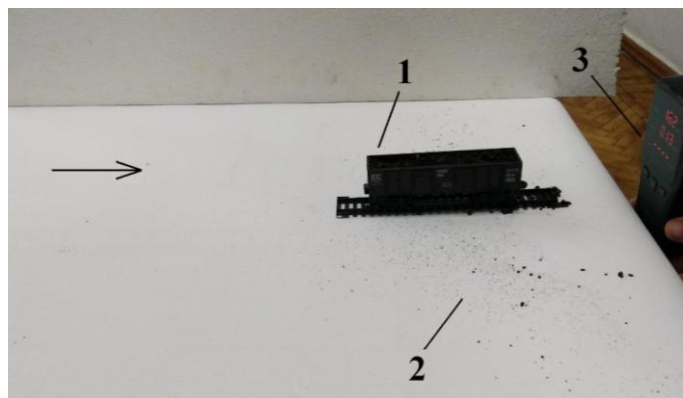


1 – модель напіввагона; 2 – зона забруднення

Рисунок 4.5 – Область забруднення за відсутності додаткових бортів на моделі напіввагона й за наявності «шапки» вантажу

Як видно з наведеного рисунка, біля моделі напіввагона сформувалася велика область забруднення, яка повністю «покриває» значну область біля магістралі. Зона забруднення має вигляд «конуса». Довжина області забруднення становить майже 6 довжин моделі напіввагона, а ширина – майже 4-5 довжин моделі вагона. Область забруднення має темний колір, особливо біля моделі. Це свідчить про значний винос вугілля з напіввагона й високий рівень забруднення підстильної поверхні. Видно, що з моделі напіввагона стався винос різних фракцій вугілля. Більші фракції випали поблизу моделі напіввагона. Цей експеримент підтверджує, що в разі використання напіввагонів без додаткових бортів і з «шапкою» вантажу відбувається інтенсивне забруднення навколишнього середовища за схемою: «вагон - повітряне середовище - підстильна поверхня».

На наступному рисунку показано, як в лабораторії проводився замір концентрації пилу за моделлю напіввагона. Для вимірювання концентрації пилу PM2.5 за моделлю вагона використовувався лазерний вимірювач WP6910 (рис. 4.6). Вимірювання здійснювалась на висоті бортів моделі напіввагона, та на довжині l від моделі (l - довжина моделі вагона).



1 - модель напіввагона; 2 - зона забруднення; 3 - прилад для вимірювання концентрації пилу WP6910

Рисунок 4.6 – Вимірювання концентрації пилу за моделлю напіввагона

На наступному етапі досліджень було проведено 3D обчислювальний експеримент з оцінки забруднення повітряного середовища біля магістралі.

Експеримент виконано на базі розроблених чисельних моделей аеродинаміки і масопереносу. Схема 3D моделі напіввагона показана на рис. 4.7. Зауважимо, що вісь X спрямована вздовж осі вагона. Форма «шапки» вантажу та форма вагона задаються в чисельній моделі за допомогою маркерів. Швидкість осідання пилу прийнята 7.6×10^{-3} м/с, швидкість повітряного потоку 14.0 м/с. Метою розрахунку була оцінка розмірів, форми та інтенсивності формованої області забруднення повітряного середовища біля залізничної магістралі.

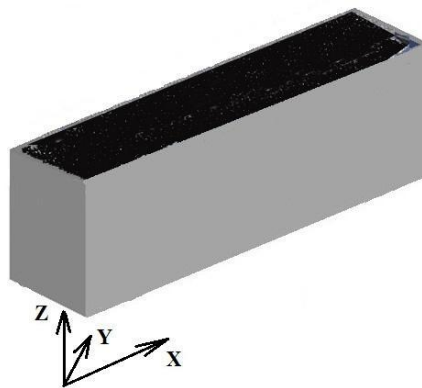
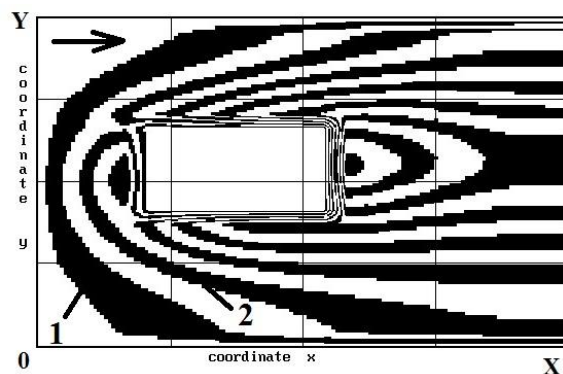


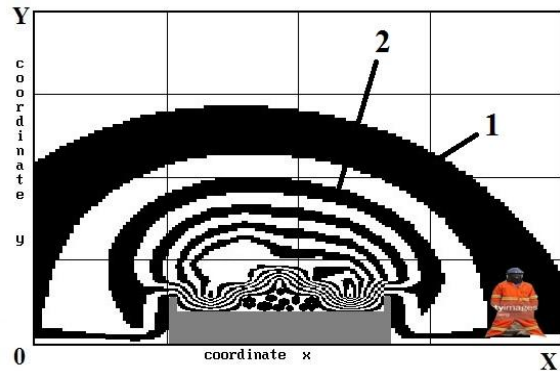
Рисунок 4.7 – Схема розрахункової області при 3D моделюванні

На рис. 4.8 і 4.9 наведено концентраційне поле пилового забруднювача у двох перерізах: відповідно $z = \text{const}$ (вигляд зверху) і $x = \text{const}$ (вигляд збоку). Схематично біля напіввагона показано розташування людини (рис. 4.8).



$$1 - C = 0,33 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0.78 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.8 – Зона забруднення біля напіввагона (вигляд зверху)

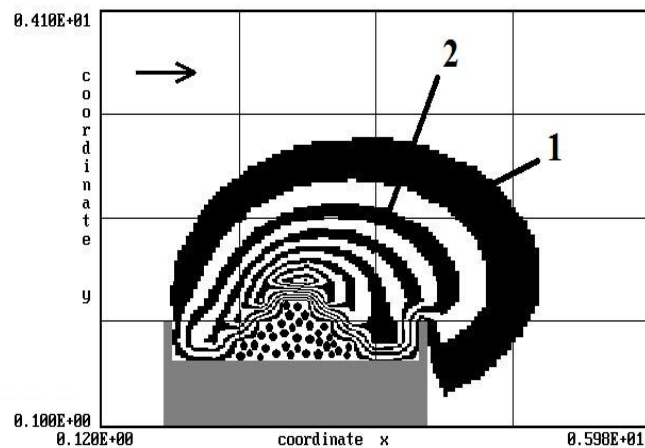


$$1 - C = 2.1 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 10.2 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.9 – Зона забруднення біля напіввагона (вигляд збоку)

Як видно з цих рисунків, результати обчислювального експерименту підтверджують формування великої області забруднення біля напіввагона. Розрахунок на базі розробленої тривимірної моделі потребує майже 1 хв комп'ютерного часу.

На рис. 4.10 наведено розподіл концентрації вугільного пилу біля напіввагона, отриманий на базі розробленої 2D чисельної моделі (розрахунок на 1 м довжини напіввагона). Розрахунок на базі розробленої двовимірної моделі потребує 10 с комп'ютерного часу.



$$1 - C = 0.15 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0.75 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.10 – Зона забруднення атмосферного повітря біля напіввагона, завантаженого з «шапкою» (розрахунок на базі 2D чисельної моделі)

Як видно з наведеного рисунка, повітряний потік виносить вугільний пил з напіввагона, що призводить до забруднення зон біля магістралі. Деяка розбіжність у розподілі ізольованої концентрації пилу в поперечному перерізі (порівняно з 3D розрахунком) пояснюється тим, що в разі моделювання на базі тривимірної моделі враховується винос пилу по всій довжині напіввагона, що призводить до широкої області забруднення, аналогічно тій, яка була отримана під час проведення фізичного експерименту. У разі використання двовимірної моделі такий ефект не враховується.

Для кількісної оцінки впливу вносу вугільного пилу з напіввагона розраховувалася концентрація пилу на висоті 1.7 м і на різній відстані від напіввагона. У цій області визначався коефіцієнт небезпеки HQ [32]:

$$HQ = AC / RfC, \quad (4.1)$$

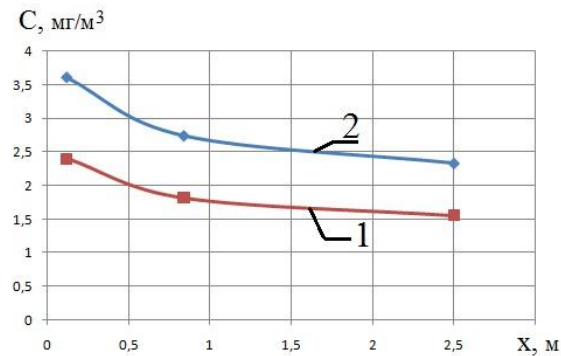
де AC – концентрація вугільного пилу біля напіввагона; RfC – референтна концентрація.

Як відомо, рівень небезпеки для людей залежить від величини цього показника, як це показано в табл. 4.2 [32].

Таблиця 4.2 – Критерій неканцерогенного ризику

Характеристики ризику	Коефіцієнт небезпеки HQ
Ризик виникнення шкідливих ефектів розглядають як нехтовно малий	<1
Гранична величина, яка не потребує термінових заходів, проте не може розглядатися як досить прийнятна	1
Імовірність розвитку шкідливих ефектів зростає пропорційно збільшенню HQ	> 1

У розрахунку показника небезпеки як значення RfC прийнята величина $1,5 \text{ мг/м}^3$ (гранично допустима концентрація, рекомендована інститутом NIOSH, норматив діє із серпня 2016 р.). Розподіл цього показника і концентрації вугільного пилу поблизу напіввагона показано на рис. 4.10.



1 – коефіцієнт HQ; 2 – концентрація вугільного пилу

Рисунок 4.11 – Розподіл концентрації вугільного пилу поблизу напіввагона й значення коефіцієнта небезпеки HQ (піввагон з «шапкою» вугілля)

Як видно з рис. 4.11, у разі завантаженні вугілля у вагон з «шапкою» відбувається досить інтенсивне забруднення атмосферного повітря біля магістралі, причому значення показника HQ біля напіввагона дорівнює 1.5.

4.3 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів типу «вертикальна стінка» для захисту навколишнього середовища від пилового забруднення

На наступному етапі досліджень була висунута робоча гіпотеза про можливість зменшення рівня забруднення навколишнього середовища за рахунок установки на напіввагон додаткових бортів типу «вертикальна стінка», що перевищують «шапку» вантажу (рис. 4.12).

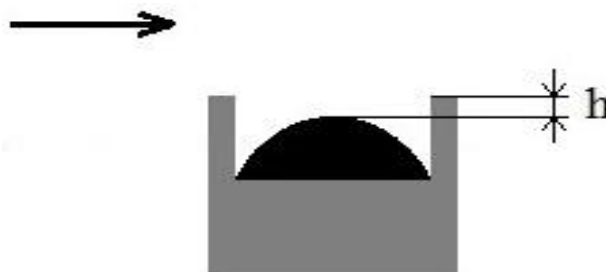
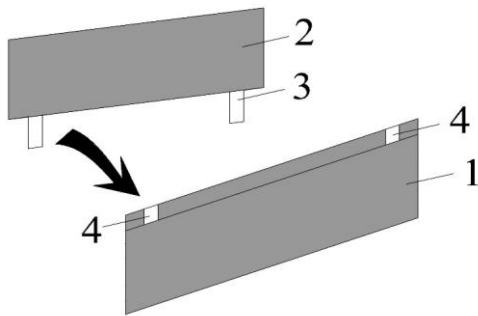


Рисунок 4.12 – Схема додаткових бортів типу «вертикальна стінка»

Принцип установки додаткових бортів у напіввагон показаний на рис. 4.13: на бортах напіввагона зварюванням робляться «вушка», куди

встановлюються напрямні штирі додаткових бортів. Можливий також варіант, коли на бортах робляться отвори для напрямних штирів.



а

1 – стінка напіввагона; 2 – додатковий борт;
3 – «напрямні штирі»; 4 – отвори для
установки додаткових бортів



б

1 – кріплення для борта;
2 – додатковий борт
(<http://www.gerina.ru/poluvagon.jpg>)

Рисунок 4.13 – Принцип розміщення додаткових бортів на стінці на піввагона розташування кріплення (а) та схематичний вигляд додаткових бортів (б)

Для перевірки робочої гіпотези були проведені експериментальні дослідження з оцінки розмірів зони забруднення підстильної поверхні в разі установки в напіввагон таких додаткових бортів. Модель такого напіввагона показана на рис. 4.14. Борти (перевищали шапку вугілля на $h=6\text{мм}$) були виготовлені з картону й закріплені на стінках моделі напіввагона. Експеримент проводився для швидкості повітряного потоку, як для базового варіанту – тобто, вагон без бортів.

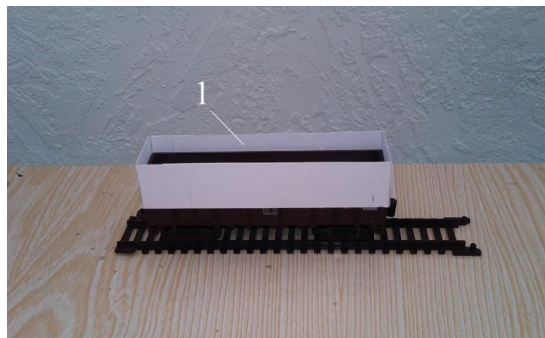
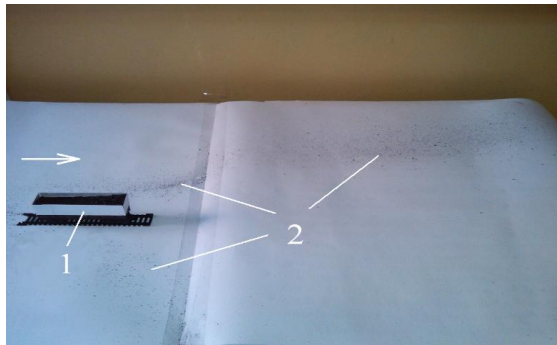


Рисунок 4.14 – Модель напіввагона з додатковими бортами типу «вертикальна стінка»

На рис. 4.15 показано зону біля моделі напіввагона з додатковими бортами типу «вертикальна стінка».



1 - модель напіввагона; 2 - зона забруднення

Рисунок 4.15 – Зона забруднення біля моделі напіввагона з додатковими бортами типу «вертикальна стінка»

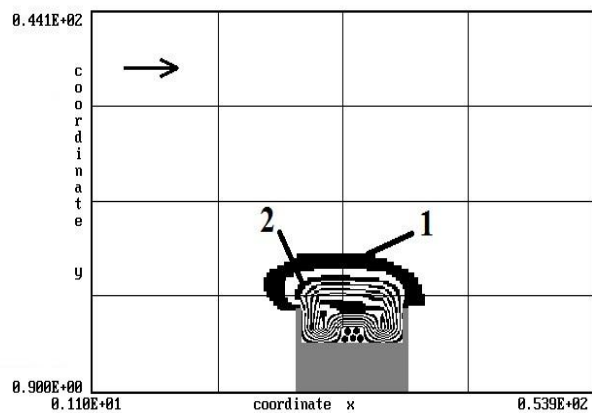
Якщо порівняти рис. 4.15 з рис. 4.5 (модель напіввагона без додаткових бортів, завантаження з «шапкою»), то видно, що застосування додаткових бортів такої форми дозволило зменшити винос великих фракцій з напіввагона. Про це свідчить колір зони забруднення – він світліший, ніж у попередньому випадку (вагон без додаткових бортів). Це означає, що застосування додаткових бортів зменшило локальну швидкість біля поверхні вантажу й кінетичної енергії повітряного потоку біля поверхні вантажу вистачило тільки на те, щоб «відірвати» дрібні частинки вантажу.

Довжина зони забруднення біля моделі напіввагона становила приблизно чотири довжини вагона, ширина – приблизно 3-5 довжин моделі. Кут розбіжності «конуса» зони забруднення більший, ніж у попередньому випадку, очевидно, що тут стався винос дрібніших фракцій і наявний винос меншої маси вантажу. Після закінчення експериментальних досліджень визначалася маса вугілля, що осіло на поверхню установки (вугілля збиралося й зважувалося). Ці дані порівнювалися з масою вугілля, що осіла на поверхню установки для базового варіанта – модель напіввагона без додаткових бортів (див. рис. 4.5). Така процедура проводилася й для інших варіантів додаткових бортів та екрана, які розглянуті нижче.

Для даного варіанта емісія вугільного пилу зменшилася приблизно на 13% – 15% порівняно з базовим варіантом, тобто – за відсутності бортів.

На наступному етапі досліджень на базі розроблених чисельних моделей були виконані розрахунки з оцінки ефективності застосування таких додаткових бортів на реальному вагоні. Інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні вантажу розраховується за отриманою експериментальною залежністю, наведеною раніше. Нижче показані результати цих обчислювальних експериментів (швидкість повітряного потоку 14.0 м/с).

На рис. 4.16 наведена зона забруднення (переріз відповідає середині вагона), отримана під час використання тривимірної чисельної моделі.

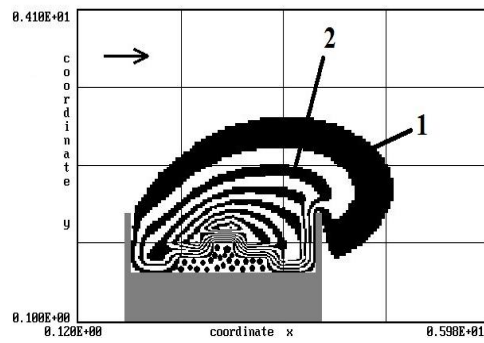


$$1 - C = 3.2 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 16.5 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.16 – Зона забруднення біля напіввагона з додатковими бортами типу «вертикальна стінка», переріз $x = \text{const}$ (розрахунок на базі 3D чисельної моделі)

Якщо порівняти цей рисунок з рис. 4.9 (розрахунок також на базі 3D CFD моделі), можна пересвідчитися, що застосування додаткових бортів дозволяє зменшити розміри зони забруднення, що і «відловлює» розроблена чисельна модель. Розрахунок на базі побудованої 3D чисельної моделі показав, що для такого варіанта емісія вугільного пилу зменшилась на 17%.

На рис. 4.17, *a* наведено зону забруднення, отриману під час використання двовимірної чисельної моделі.



а



б

Рисунок 4.17 – Зона забруднення біля напіввагона з додатковими бортами типу «вертикальна стінка», розрахунок на базі 2-D чисельної моделі (а) та в разі виносу пилу з причепа (б): 1 – $C = 0,11 \text{ мг/м}^3$; 2 – $C = 0,58 \text{ мг/м}^3$

Як видно з наведеного рисунка, над поверхнею вантажу формується область з великим градієнтом концентрації вугільного пилу. Також видно, що вітровий потік захоплює пил і виносить його через борт напіввагона в напрямку руху вітрового потоку. Також видно, що під дією сили тяжіння частинки пилу рухаються вниз, уздовж стінки напіввагона.

На рис. 4.17, б показано винос пилу з причепа. Це експеримент, який проводився на території ДНУЗТ. Емісія пилу створювалася шляхом скидання на підлогу причепа посудини з будівельним сміттям, тобто джерело емісії було напівбезперервне. Далі проводилася фотозйомка формованої зони забруднення. Швидкість вітру на рівні борту причепа становила майже 2,7 - 3,3 м/с. Порівнюючи рис. 4.17, а і рис. 4.17, б, бачимо якісне узгодження за формою реальної зони забруднення і розрахованої за розробленою чисельною моделлю.

На рис. 4.18 показано значення концентрації вугільного пилу біля вагона (розрахунок на базі 2D чисельної моделі, висота 1,7 м).

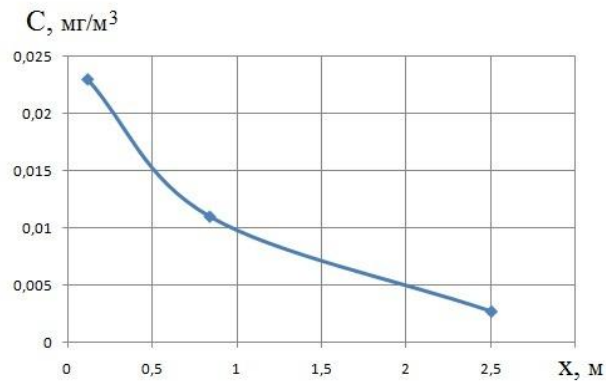


Рисунок 4.18 – Розподіл концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі (вагон з додатковими бортами типу «вертикальна стінка»)

Як видно з рис. 4.18, установка додаткових вертикальних бортів «вертикальна стінка» дозволяє зменшити рівень забруднення повітряного середовища: концентрація вугільного пилу ніде на цій ділянці не перевищує граничного значення $RfC = 1.5 \text{ мг/м}^3$.

4.4 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів типу «крило» для захисту навколишнього середовища від забруднення

На наступному етапі досліджень було висунуто робочу гіпотезу про те, що можливе зменшення інтенсивності навколишнього середовища біля залізничної магістралі, якщо використовувати додаткові борти типу «крило», що мають Г-подібну форму (рис. 4.19). Для підтвердження цієї робочої гіпотези було проведено фізичний експеримент, результати якого наведені нижче. На рис. 4.20 показана модель напіввагона з додатковими бортами типу «крило» ($H=5\text{мм}$, кут- 45^0). Експеримент проводився для швидкості повітряного потоку, як для базового варіанту – тобто, вагон без бортів.

На рис. 4.21 наведено результати експерименту з оцінки зони забруднення таким напіввагоном.

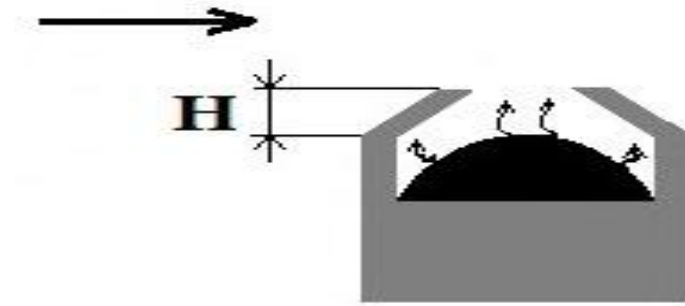


Рисунок 4.19 – Схема додаткових бортів типу «крило» Г-подібної форми

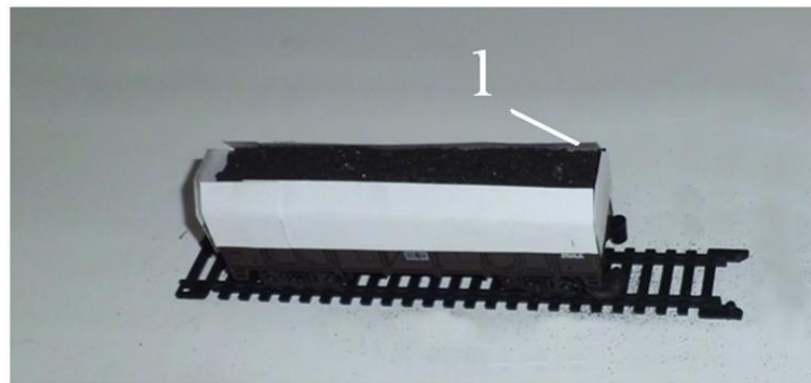


Рисунок 4.20 – Модель напіввагона з додатковими бортами типу «крило» Г - подібної форми (1)

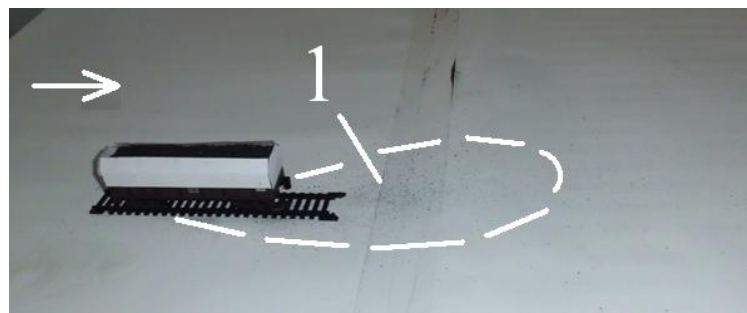


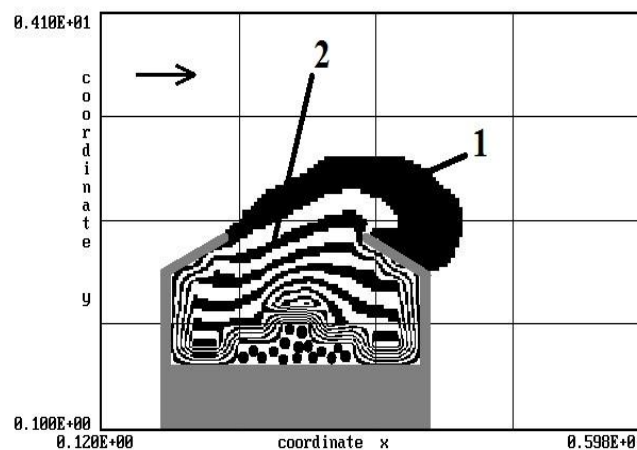
Рисунок 4.21 – Зона забруднення (1) біля моделі напіввагона з додатковими бортами типу «крило» Г-подібної форми

Якщо порівняти рис. 4.21 з рис. 4.5 (модель напіввагона без додаткових бортів), то видно, що застосування додаткових бортів такої форми дозволило істотно зменшити розміри області забруднення біля моделі напіввагона. Зона

забруднення має форму «краплі». Довжина цієї зони майже дорівнює довжині напіввагона, ширина – менша ніж довжина моделі напіввагона. З наведеного рисунка також добре видно, що в разі використання додаткових бортів вказаної форми відбулося зменшення маси винесеного з напіввагона вугілля порівняно з вагоном без додаткових бортів, колір зони забруднення не настільки насичений, як у попередніх двох випадках. Це свідчить про зменшення величини локальної швидкості повітряного потоку біля поверхні вантажу. Для такого варіанта захисту емісія вугільного пилу зменшилась приблизно на 19% - 21% порівняно з базовим варіантом (немає додаткових бортів).

На наступному етапі досліджень були виконані розрахунки на базі розробленої 2D CFD моделі з оцінки ефективності застосування додаткових бортів Г-подібної форми, встановлених на реальному напіввагоні. Інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні вантажу розраховується за отриманою експериментальною залежністю, наведеною раніше, тобто враховувалося, що інтенсивність емісії залежить від локальної швидкості повітряного потоку (швидкість оснороненого потоку 14.0 м/с).

На рис.4.22 показана картина забруднення атмосферного повітря біля напіввагона з вугіллям для розглянутого сценарію.



$$1 - C = 0.045 \text{ мг/м}^3 ; 2 - C = 0.224 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.22 – Зона забруднення біля напіввагона за наявності додаткових бортів Г-подібної форми

З наведеного рисунка видно, що установка додаткових бортів призводить до зміни інтенсивності й форми зони пилового забруднення порівняно зі сценарієм, коли немає додаткових бортів. У цьому випадку відбувається часткова контейнеризація вантажу. Ізолінії концентрації пилу всередині напіввагона повторюють форму «крила». Пил виходить з отвору між «крилами» і зноситься повітряним потоком по «крилу» в прилеглу до вагона область повітряного простору.

На другому етапі досліджень розраховувалася концентрація пилу в атмосферному повітрі біля реального напіввагона. Ці дані показані на рис. 4.23 (рівень 1,7 м).

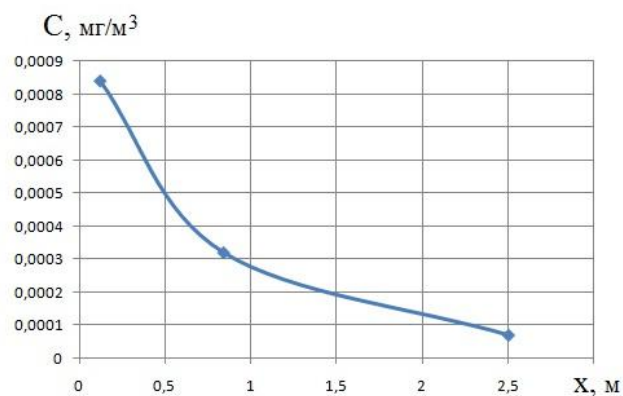


Рисунок 4.23 – Розподіл концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі (вагон з додатковими бортами Г-подібної форми типу «крило»)

Як видно з наведеного рисунка, установка додаткових бортів типу «крило» дозволяє істотно зменшити рівень забруднення повітряного середовища. Концентрація вугільного пилу ніде на цій ділянці не перевищує граничного значення $RfC = 1,5 \text{ мг/м}^3$. На базі виконаного обчислювального експерименту встановлено, що емісія вугільного пилу зменшилась приблизно на 22 % порівняно з базовим варіантом (нема додаткових бортів).

4.5 Дослідження ефективності застосування додаткових бортів типу «внутрішнє крило» для захисту навколишнього середовища від забруднення

На наступному етапі досліджень була висунута робоча гіпотеза про те, що можливим є зменшення інтенсивності забруднення робочої зони біля магістралі в разі установки в напіввагон додаткових бортів типу «внутрішнє крило». Схема такого борту показана на рис. 4.24.

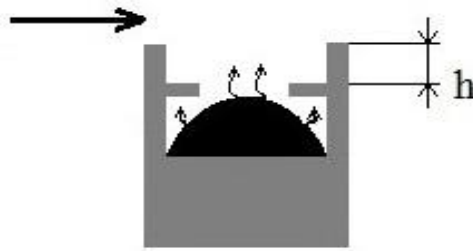
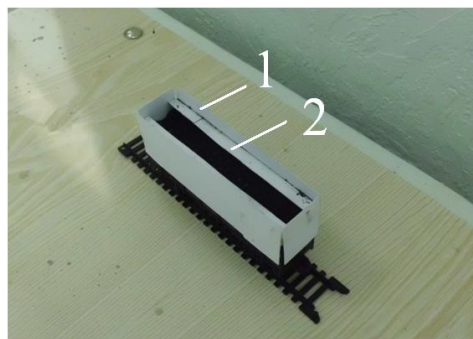


Рисунок 4.24 – Схема додаткових бортів типу «внутрішнє крило»

Для перевірки робочої гіпотези було проведено фізичний експеримент. На рис. 4.25 показано модель напіввагона з додатковими бортами типу «внутрішнє крило» (довжина «внутрішнього крила» 57мм, висота $h=4$ мм). Експеримент проводився для швидкості повітряного потоку, як для базового варіанту – тобто, вагон без бортів.

На рис. 4.26 наведено результати експерименту з оцінки зони забруднення за таким напіввагоном.



1 – додатковий борт; 2 – «внутрішнє крило»

Рисунок 4.25 – Модель напіввагона з додатковими бортами типу «внутрішнє крило»

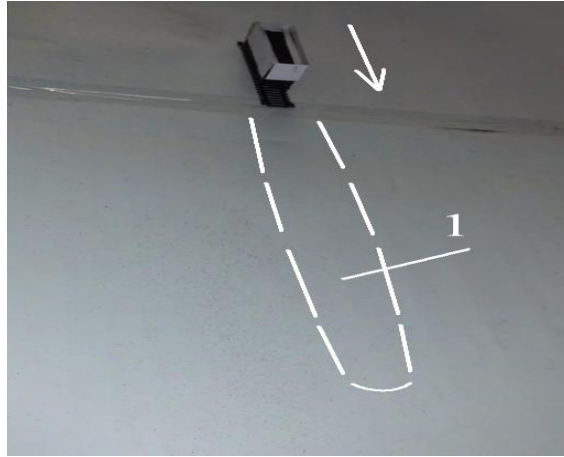


Рисунок 4.26 – Зона забруднення (1) в разі використання додаткових бортів типу «внутрішнє крило»

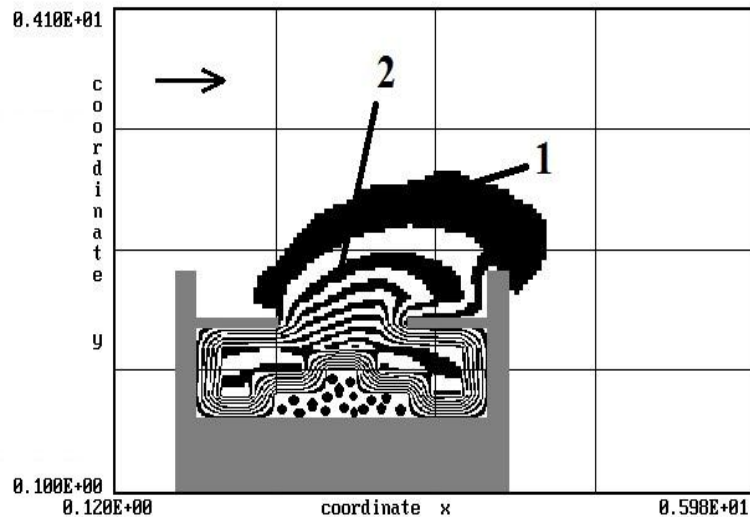
Порівнюючи рис. 4.26 з рис. 4.5, бачимо, що зона забруднення, яка формується, значно менша як за площею, так і за інтенсивністю, ніж у разі використання напіввагона без додаткових бортів. Тут форма зони забруднення має вигляд витягнутого «прямокутника». Також видно, що на відміну від варіанта, коли немає додаткових бортів, тут стався винос дрібних фракцій, про що свідчить колір цієї зони. Довжина зони забруднення становить приблизно 3 довжини моделі, ширина – майже одну довжину моделі.

Таким чином, результати виконаного експерименту підтверджують висунуту робочу гіпотезу про можливу мінімізацію виносу вугільного пилу з напіввагона за рахунок використання додаткових бортів типу «внутрішнє крило». Для цього варіанта винос вугілля з напіввагона зменшився приблизно на 22% – 24%.

На наступному етапі досліджень було виконано обчислювальний експеримент на базі 2-D CFD моделі для чисельного визначення концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі у разі використання додаткових бортів типу «внутрішнє крило» для реального вагона. Інтенсивність емісії вугільного пилу від поверхні вантажу розраховується за отриманою

експериментальною залежністю, наведеною раніше Швидкість повітряного потоку 14 м/с.

На рис. 4.27 показана картина забруднення атмосферного повітря біля напіввагона з вугіллям для розглянутого сценарію.



$$1 - C = 0.044 \text{ мг/м}^3 ; 2 - C = 0.222 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.27 – Зона забруднення біля напіввагона за наявності додаткових бортів типу «внутрішнє крило»

З наведеного рисунка видно, що установка додаткових бортів приводить до зміни інтенсивності й форми зони забруднення, також відбувається часткова контейнеризація вантажу. Під «внутрішнім крилом» формується область з високим градієнтом концентрації пилу. Винос пилу відбувається через отвір між «внутрішніми крилами». Розрахунок на базі побудованої чисельної моделі показав, що для такого варіанта емісія вугільного пилу зменшилась на 26 %.

Далі розраховувалася концентрація пилу в атмосферному повітрі біля напіввагона. Ці дані показані на рис. 4.28 (рівень 1,7 м).

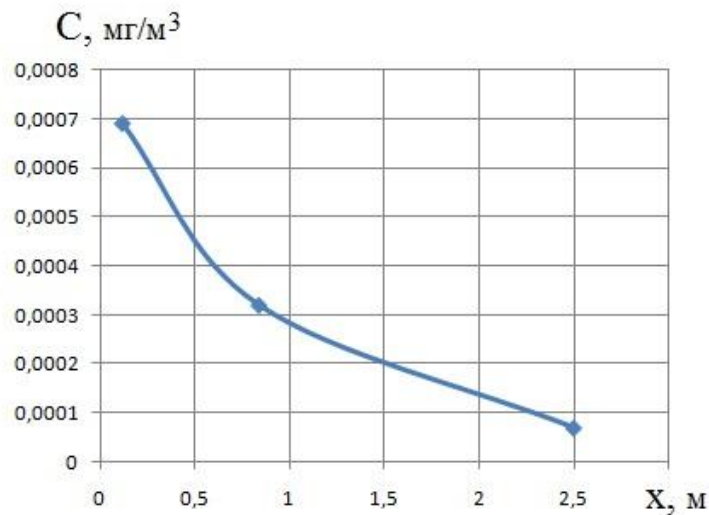


Рисунок 4.28 – Розподіл концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі (вагон з додатковими бортами типу «внутрішнє крило»)

Як видно з наведеного рисунка, установка додаткових бортів типу «внутрішнє крило» дозволяє, як і в попередньому сценарії, значно знизити рівень забруднення повітряного середовища. Концентрація вугільного пилу ніде на цій ділянці не перевищує граничного значення $RfC = 1,5 \text{ мг/м}^3$.

Слід зауважити, що виготовлення додаткових бортів (матеріал: дерево, пластик тощо) не потребує значних матеріальних витрат. Так, вартість додаткових бортів з дерева становить приблизно 8 євро, установка кріплень на вагон для додаткових бортів – майже 2 євро.

4.6 Дослідження ефективності установки екрана у напіввагон для захисту навколишнього середовища від забруднення

Для зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу з напіввагона пропонується використовувати установку екрана у напіввагон, який розміщується поперек вагона (рис. 4.31). Цей екран типу «бар'єр» являє собою перешкоду, на яку «набігає» повітряний потік, як наслідок відбувається його гальмування, а значить, зменшення швидкості потоку над вантажем.

Для перевірки робочої гіпотези про те, що установка екрана дозволить зменшити інтенсивність виносу вугільного пилу з напіввагона, був проведений фізичний експеримент. Спочатку (рис. 4.29) експеримент був проведений для моделі напіввагона без екрана. На відміну від попередніх випадків, тут висота «шапки» вантажу була нижчою, ніж у попередніх випадках. Тобто це також був «погано завантажений вагон», але з меншою по висоті «шапкою» вантажу. Швидкість повітряного потоку: 13.4 м/с – 14.1 м/с.



Рисунок 4.29 – Модель напіввагона з вантажем (немає екрана)

На рис. 4.30 наведена зона забруднення біля моделі напіввагона без екрана.

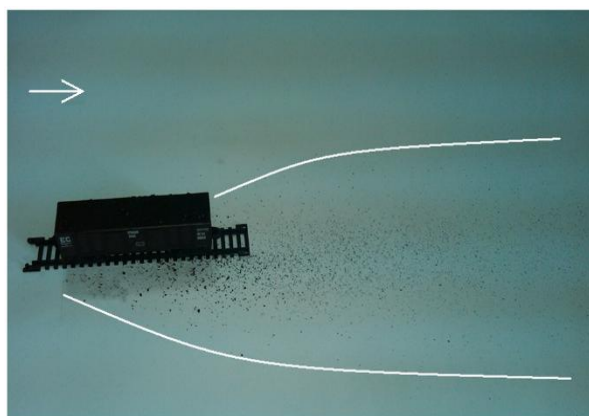


Рисунок 4.30 – Зона забруднення (усічена по довжині) за відсутності екрана

Зона забруднення для цього сценарію має вигляд конуса. Довжина області забруднення становить приблизно 5 довжин моделі напіввагона, а ширина – приблизно 4 довжини моделі напіввагона. Область забруднення має темний колір, особливо біля моделі, що свідчить про значний винос вугілля з моделі напіввагона. Великі фракції випали як поблизу моделі напіввагона, так і в сліді.

На рис. 4.31 показано модель напіввагона з екраном (висота екрана 1 см, екран розташовано на відстані 15 мм від торцевої стінки вагону).

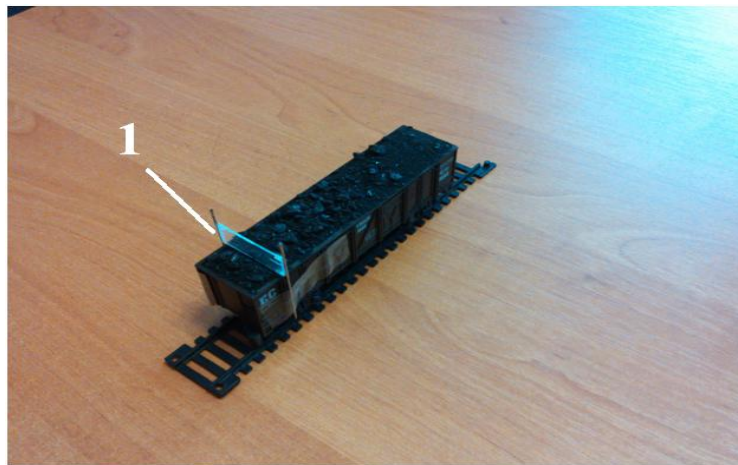


Рисунок 4.31 – Модель напіввагона з екраном (1)

На рис. 4.32 наведена зона забруднення біля моделі напіввагона з екраном.

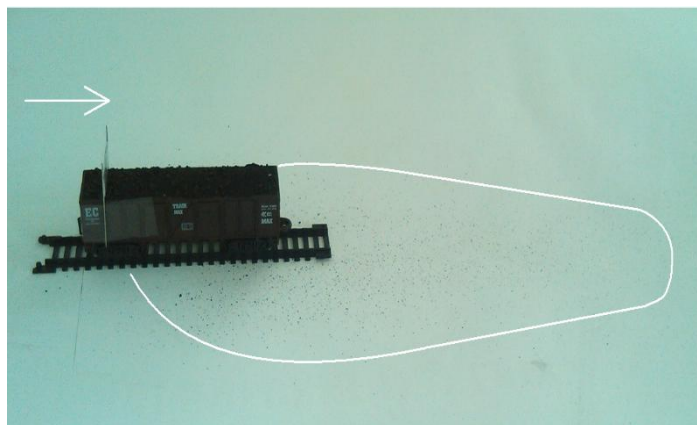


Рисунок 4.32 – Зона забруднення в разі використання екрана

Порівнюючи рис. 4.32 з рис. 4.30, бачимо, що в разі використання екрана зона забруднення стала меншою за розмірами. Тут форма зони забруднення має форму пляшки. На відміну від варіанта, коли немає екрана, тут стався винос дрібних фракцій, про що свідчить «світлий» колір зони забруднення. Довжина зони забруднення становить приблизно 2.5 довжини моделі, ширина – приблизно 1 довжину моделі.

На основі аналізу цієї інформації можливо якісно оцінити ефективність використання екрана на напіввагоні із сипким вантажем. Для такого варіанта експерименту винос вугільного пилу зменшився приблизно на 11% - 12%. Розрахунок на базі побудованої 2D чисельної моделі (швидкість повітряного потоку 14м/с) показав, що для такого варіанта емісія вугільного пилу зменшилась на 14%.

Таким чином, результати виконаного експерименту підтвердили правильність робочої гіпотези про можливе застосування екранів у напіввагоні для мінімізації рівня забруднення навколишнього середовища.

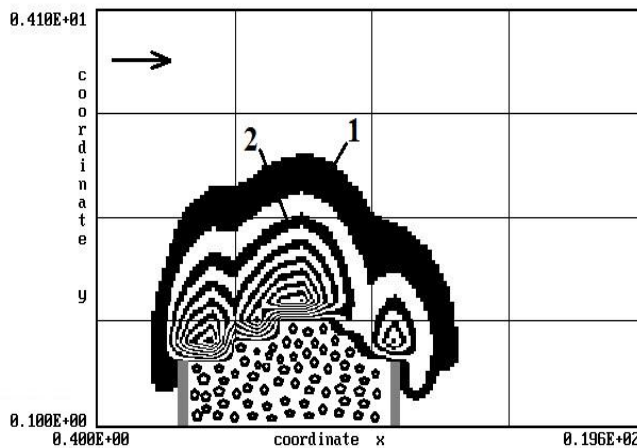
Нижче, в табл. 4.3 наведено дані про середнє значення концентрації пилу $PM_{2.5}$ позаду моделі напіввагона при встановленні на неї різних видів захисту.

Таблиця 4.3 – Значення концентрації пилу $PM_{2.5}$ позаду моделі напіввагона, $мкг/м^3$

Тип захисту	Немає захисту	Борт «вертикальна стінка»	Борт «крило»	Борт «внутрішнє крило»	Екран
Концентрація пилу позаду моделі	38	15	12	12	19

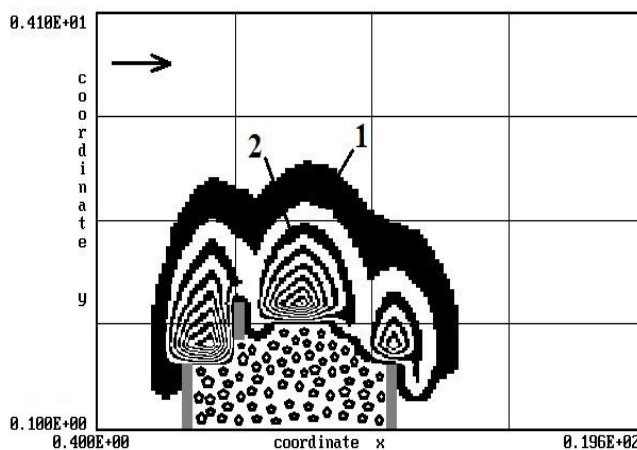
Аналізуючи дані з табл. 4.3, можна стверджувати, що застосування запропонованих додаткових бортів, екрана дозволяє зменшити інтенсивність пилового забруднення навколишнього середовища.

На рис. 4.33 і 4.34 показано дані чисельного моделювання зони забруднення атмосферного повітря без екрана й у разі використання екрана на реальному вагоні. Тут зображено розподіл концентрації домішки вздовж напіввагона.



$$1 - C = 0,21 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0,64 \text{ мг/м}^3$$

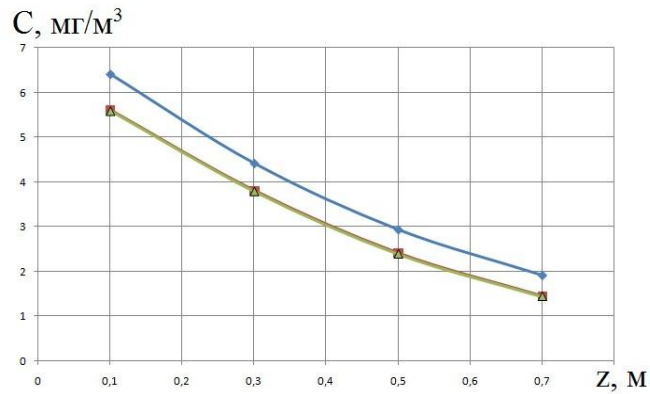
Рисунок 4.33 – Зона забруднення над напіввагоном без екрана



$$1 - C = 0,16 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0,53 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.34 – Зона забруднення над напіввагоном у разі використання екрана

На рис. 4.35 показано розрахункові значення концентрації пилу в атмосферному повітрі на різній висоті від «шапки» вантажу. Обрано переріз, що відповідає середині напіввагона. Розрахунок для сценарію «з екраном» виконувався на двох сітках: 25×21 вузол і 50×42 вузлів.



◆ – вагон без екрана; □ – вагон з одним екраном (сітка 25×21 вузол); Δ – вагон з екраном (сітка 50×42 вузли)

Рисунок 4.35 – Розподіл концентрації пилу в атмосферному повітрі над вагоном

Як видно з рис. 4.35, використання екрана дозволяє зменшити рівень забруднення атмосферного повітря.

Тепер визначимо додатковий опір напіввагона при установці екрана. Вважаючи, що висота екрана становить приблизно $h = 1$ м, ширина $b = 3$ м, густина повітря $1,2$ кг/м³, коефіцієнт опору екрана $1,1$ (плоска пластина), швидкість потяга 60 км/год, то цей опір можна розрахувати за відомою залежністю з аеродинаміки [41]

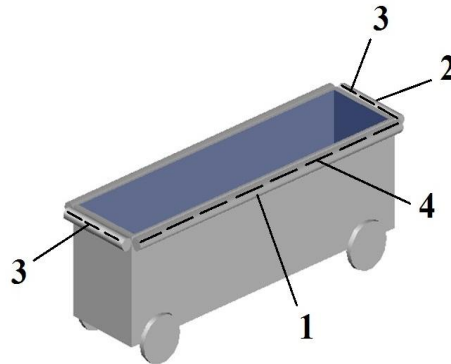
$$F_x = C_x \rho S \frac{V^2}{2},$$

де C_x – коефіцієнт опору; $S = h \cdot b$ – площа екрана; ρ – густина повітря; V – швидкість руху.

Розрахунок показує, що додатковий опір на 1 напіввагон з екраном буде майже 60 кг. Маса напіввагона з вугіллям становить приблизно 82 т, тобто додатковий опір, внесений екраном, незначний. Також зауважимо, що вартість екрана з дерева становить майже 3 євро, установка кріплень на вагон для екрана – приблизно 1 євро.

На закінчення цього підрозділу розглянемо ще один варіант екрана – повітряна завіса. Для зменшення інтенсивності виносу вугільного пилу з

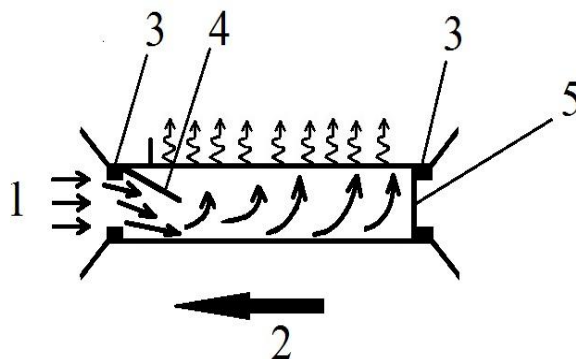
напіввагона пропонується використовувати таку завісу. Ідея роботи цієї завіси така. По периметру вагона у верхній його частині розміщуються повітропроводи, які мають зверху перфорацію для виходу повітря. Схема розташування повітропроводів показана на рис. 4.36. Кінці кожного повітропровода відкриті, але мають зворотний клапан, як, наприклад, для повітропровода, розташованого на бічних сторонах напіввагона (рис. 4.36).



- 1 – повітропровід, розташований уздовж бічної стінки напіввагона;
 2 – повітропровід, розташований на торцевих стінках напіввагона;
 3, 4 – перфорація в повітропроводах

Рисунок 4.36 – Схема розміщення повітропроводів на корпусі напіввагона

Під час руху напіввагона в той кінець повітропровода, який спрямований у напрямку руху потяга, починає надходити повітря.

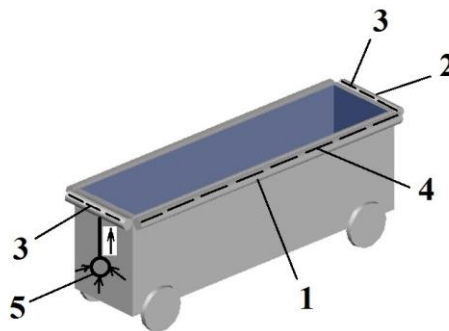


- 1 – вхід повітряного потоку; 2 – напрямок руху напіввагона; 3 – сідло клапана; 4, 5 – клапани

Рисунок 4.37 – Схема повітропровода

Потік повітря, що входить у повітропровід, відкриває клапан 4 (рис. 4.37), при цьому клапан 5 – закривається. Повітря, що надійшло, рухається через перфорацію (щілину) назовні. Цей процес умовно показаний на рисунку хвилястими стрілками. Таким чином, під час руху вагона виникає вертикальний повітряний струмінь, який, як екран, розташований по периметру напіввагона, перешкоджає виносу вугільного пилу й знижує тим самим забруднення навколишнього середовища. Використання такого «екрана» можливе тільки на торцевих стінках напіввагона.

Варіюючи площу вхідних отворів повітропровода, площу його поперечного перерізу, площу перфорації, на основі аеродинамічного розрахунку визначається швидкість повітряного потоку в повітряній завісі та її величина, залежно від швидкості руху потяга. Іншим підходом може бути використання повітродувки, розміщеної на корпусі вагона для подачі повітря в перфоровані повітропроводи, що перфоровані (рис. 4.38).



1 – повітропровід, розташований уздовж бічної стінки напіввагона;

2 – повітропровід, розташований на торцевих стінках напіввагона;

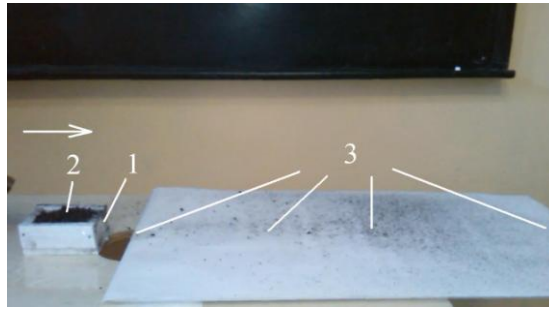
3,4 – перфорація в повітропроводах; 5 – повітродувка

Рисунок 4.38 – Схема розміщення повітродувки на корпусі напіввагона

Для підтвердження робочої гіпотези про можливість використання повітряної завіси з метою мінімізації виносу вугільного пилу з напіввагона був проведений фізичний експеримент. Для цього використовувалася установка, показана на рис. 4.39. Вагон моделювався посудиною з пінопласту (розміри: 12см*12см*7см), заповненою вугіллям. За цією моделлю

напіввагона в столі було зроблено отвір, звідки вертикально вгору надходило повітря від повітродувки. Швидкість головного потоку повітря була 7.2 м/с – 8.6 м/с, швидкість потоку в повітряній завісі 11.6 м/с – 13.8 м/с, Результати фізичного експерименту наведені нижче.

На рис. 4.39 показано зону забруднення біля моделі за відсутності повітряної завіси.

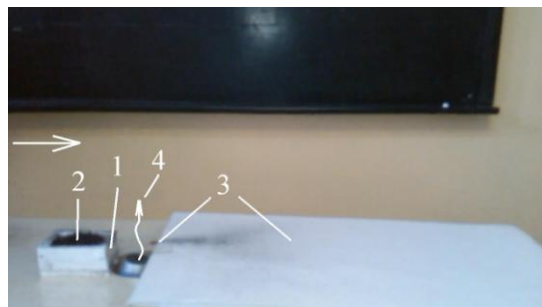


1 – модель вагона; 2 – вугілля; 3 – зона забруднення

Рисунок 4.39 – Зона забруднення за моделлю за відсутності вертикальної завіси

З рис. 4.39 добре видно, що біля моделі вагона сформувалася велика та інтенсивна зона пилового забруднення. Довжина зони приблизно 6 довжин моделі, ширина – майже 4 -5 довжин моделі.

На рис. 4.40 наведено зону забруднення за наявності повітряної завіси біля моделі.



1 – модель вагона; 2 – вугілля; 3 – зона забруднення; 4 – струмінь повітряної завіси

Рисунок 4.40 – Зона забруднення за моделлю за наявності повітряної завіси

Порівнюючи рис. 4.40 і 4.39, бачимо, що застосування повітряної завіси різко знизило розміри й інтенсивність зони забруднення біля моделі.

Таким чином, результати проведеного експерименту підтвердили правильність робочої гіпотези про можливе застосування повітряної завіси для мінімізації рівня забруднення навколишнього середовища. Для імплементції цієї ідеї на реальному напіввагоні необхідні подальші дослідження.

4.7 Моделювання забруднення атмосферного повітря в селітебній зоні при русі потяга з вугіллям

На основі розробленої 3D чисельної моделі й коду «Coal Dust Emission» виконано розрахунок забруднення атмосферного повітря в селітебній зоні біля станції Enugu під час руху потяга з вугіллям. На рис. 4.41 стрілкою показано напрямок руху потяга. Вважається, що вугілля завантажене в напіввагони з «шапкою».



Рисунок 4.41 – Вигляд розрахункової області (селітебна зона біля станції Enugu, Нігерія) (Google image)

У цьому регіоні селітебна зона розташована на відстані приблизно 10 м – 12м від магістралі. Прогноз здійснюється на базі розробленої тривимірної чисельної моделі масопереносу. Розглядається рух потягу, до складу якого входять 10 вагонів з вугіллям. Площа поверхні вантажу в кожному вагоні приймається 50м^2 ; швидкість потягу складає 18 км/год, швидкість повітря 4 м/с, напрям вітру північно-західний. Кожен вагон з вугіллям моделюється

точковим джерелом пилового забруднення за допомогою дельта-функції Дірака. Але оскільки вагон рухається, координати його змінюються в дельта-функції. Інтенсивність викиду вугільного пилу з вагону розраховується на базі емпіричної формули, що наведена в п. 4.1.

На рис. 4.42, 4.43 показана зона пилового забруднення (рівень $z = 3,5$ м) для різних моментів часу під час проходження потяга.



$$1 - C = 0.43 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0.82 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.42 – Зона пилового забруднення біля станції Епиги під час руху потяга з вугіллям ($t = 4$ с)



$$1 - C = 0.47 \text{ мг/м}^3; 2 - C = 0.88 \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.43 – Зона пилового забруднення біля станції Епиги під час руху потяга з вугіллям ($t = 8$ с)

Як видно з наведених рисунків, під час руху потяга формується велика зона пилового забруднення. Під вплив джерела емісії пилу потрапляють будови біля залізниці.

У табл. 4.4 наведено розрахункові дані про концентрацію вугільного пилу поблизу магістралі для моменту часу $t = 9$ с (на рис.4.41 позиція, уздовж якої показано розподіл концентрації пилу, вказана штриховою лінією). У цій таблиці наведено дані аналогічного розрахунку, але якщо в напіввагонах будуть встановлені додаткові борти типу «внутрішнє крило».

Таблиця 4.4 – Концентрація пилу в атмосферному повітрі на різній відстані від магістралі (концентрація наведена в безрозмірному вигляді)

Відстань Y , м	Концентрація, $\text{мг}/\text{м}^3$	
	«Погано» навантажений вагон	Вагон з бортом «внутрішнє крило»
2	10.63	5.12
4	3.73	1.64
6	0.87	0.31
11	0.46	0.07

Як видно з табл. 4.4, використання додаткових бортів привело до значного зменшення рівня забруднення атмосферного повітря.

На наступних рисунках наведена зона забруднення після проходження потяга з вугіллям для декількох моментів часу (тобто вже без присутності джерела емісії вугільного пилу).



$$1 - C = 0.81 \cdot 10^{-4} \text{ мг}/\text{м}^3 ; 2 - C = 1.7 \cdot 10^{-4} \text{ мг}/\text{м}^3$$

Рисунок 4.44 – Зона пилового забруднення біля станції Епуги після проходження потяга з вугіллям ($t = 14$ с)



$$1 - C = 0.12 \cdot 10^{-8} \text{ мг/м}^3 ; 2 - C = 0.23 \cdot 10^{-6} \text{ мг/м}^3$$

Рисунок 4.45 – Зона пилового забруднення біля станції Епуги після проходження потяга з вугіллям ($t = 24$ с)

Як видно з наведених рисунків, хмара пилу, яка сформувалася в атмосфері під час проходження потяга, зноситься вітровим потоком і накриває селітебну зону, тобто процес забруднення повітряного середовища й підстильної поверхні після проходження потяга з вугіллям триває.

Висновки до розділу 4

1. Вперше наведено результати фізичних експериментів, що підтверджують висунуті робочі гіпотези про можливість зниження рівня забруднення навколишнього природного середовища шляхом використання на вагонах з вугіллям додаткових бортів або екрана. Результати експериментів показали, що застосування додаткових бортів і екрана в напіввагоні приводить до зменшення виносу з нього пилу й тим самим мінімізується рівень забруднення навколишнього природного середовища.

2. За допомогою розроблених чисельних моделей і створених кодів вперше виконано дослідження з оцінки рівня забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля в напіввагонах з додатковими бортами та екраном. Результати цих досліджень підтвердили, що застосування таких методів захисту приводить до зниження концентрації вугільного пилу в атмосферному повітрі.

3. Наведені результати досліджень показують, що побудовані чисельні моделі дозволяють вперше оперативно визначити рівень забруднення атмосферного повітря з урахуванням руху вантажного потяга з вугіллям.

4. Результати виконаних обчислювальних експериментів свідчать про те, що застосування розроблених кодів дозволяє отримувати прогнозну інформацію про рівень забруднення атмосферного повітря з урахуванням цілого комплексу важливих фізичних факторів, що впливають на процес розсіювання вугільного пилу. Тому за своїми можливостями запропоновані чисельні моделі наближаються до можливостей сучасного фізичного експерименту.

ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота містить отримані автором результати, які в сукупності вирішують науково-практичне завдання щодо зниження рівня забруднення навколишнього природного середовища при перевезенні вугілля в напіввагонах. Виконані в роботі дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Виконано аналіз факторів, що впливають на винос вугільного пилу при транспортуванні вугілля у вагонах і показано, що найважливішим фактором, що спричиняє винос вугільного пилу, є величина локальної швидкості повітряного потоку біля вантажу, тому для запобігання масштабній емісії пилу з напіввагона необхідно вирішити завдання зі зменшення локальної швидкості повітряного потоку біля поверхні вугілля.

2. На основі системного аналізу наукових праць стосовно забруднення навколишнього природного середовища при перевезенні вугілля в напіввагонах встановлено, що існуючі методи захисту навколишнього середовища від забруднення мають високу вартість, не завжди є ефективними, потребують використання додаткового обладнання на станціях завантаження. Для вирішення цієї проблеми було розроблено нові підходи щодо мінімізації рівня забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля.

3. Виконано аналіз моделей та методів, що використовуються на практиці для оцінки рівня забруднення довкілля при перевезенні вугілля, і показано, що вони мають суттєві обмеження та не дозволяють визначити ефективність застосування різних методів захисту довкілля від забруднення при транспортуванні вугілля, що потребує вдосконалення моделей і методів, які враховують рух потяга з вугіллям, метеоумови, траєкторію руху потягу, види захисту, застосовані на вагонах.

4. На основі виконаних експериментальних досліджень встановлено, що застосування в напіввагонах додаткових бортів типу «вертикальна стінка»

дозволяє зменшити винос вугільного пилю з напіввагона на 13 % –15 %; застосування додаткових бортів типу «крило» дозволяє зменшити винос вугільного пилю з напіввагона на 19 % –21 %; застосування додаткових бортів типу «внутрішнє крило» дозволяє зменшити винос вугільного пилю з напіввагона на 22 % – 24 %; застосування екрана дозволяє зменшити винос вугільного пилю на 11% –12 %.

5. Експериментальним шляхом показано можливість використання нового підходу, а саме: застосування повітряної завіси на вагоні, що дозволяє зменшити рівень забруднення навколишнього середовища при перевезенні вугілля.

6. Для оцінки інтенсивності емісії вугільного пилю, що виноситься з поверхні вантажу, отримано емпіричну модель, що дозволяє розрахувати масу пилю, що потрапляє в атмосферу при різній локальній швидкості повітря біля поверхні вугілля.

7. Розроблено комплекс чисельних моделей, що дозволяють прогнозувати запиленість атмосферного повітря при перевезенні вугілля в напіввагонах з урахуванням форми вагона та форми додаткових бортів і екрана. Верифікація розроблених чисельних моделей підтвердила їх адекватність.

8. Удосконалено метод визначення рівня забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля, що дозволяє при оцінці рівня забруднення враховувати траєкторію руху потяга, метеоумови, швидкість потяга з вугіллям.

9. Розроблені чисельні моделі та методи захисту довкілля використовуються в ТОВ «Енергосервіс-КР» для розробки технології захисту атмосферного повітря від забруднення при транспортуванні залізної руди та вугілля, а також у навчальному процесі Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абрамовський Є. Р., Гринчишин Ю. Л., Єгоров Є. В., Загній О. А. Методи розрахунку концентрації повітряних забруднень на міській території : навч. посіб. Дніпропетровськ : Наука і освіта, 2010. 223 с.
2. Аргучинцев В. К., Аргучинцев А. В. Моделирование мезомасштабных гидротермодинамических процессов и переноса примесей в атмосфере и гидросфере региона оз. Байкал. Иркутск : Изд-во Иркутского гос. ун-та, 2007. 255 с.
3. Белолипецкий В. М., Костюк В. Ю., Шокин Ю. И. Математическое моделирование течений стратифицированной жидкости. Новосибирск : Наука, 1991. 116 с.
4. Беляєв Н. Н., Карпо А. А. Моделирование процесса сноса угольного концентрата из полувагонов. *Наук. вісн. буд-ва* : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архітектури. Харків, 2016. № 1 (83). С. 196–199.
5. Беляєв Н. Н., Коренюк Е. Д., Хрущ В. К. Методы экспресс расчета уровня загрязнения атмосферы. Днепропетровск : Наука и образование, 2002. 192 с.
6. Беляєв Н. Н., Берлов А. В., Машихина П. Б. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография. Днепропетровск : «Акцент ПП», 2014. 127 с.
7. Беляєв Н. Н., Гунько Е. Ю., Росточило Н. В. Защита зданий от проникновения в них опасных веществ : монография. Днепропетровск : «Акцент ПП», 2013. 136 с.
8. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Минимизация интенсивности выноса пыли из полувагона при транспортировке угля. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті* : науковий журн. Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2016. № 11. С. 93–100.

9. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Модели оценки уровня загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 5 (65). С. 22–29.
10. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Проблема уноса угольной пыли. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 6 (66). С. 17–24.
11. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Расчет динамики загрязнения примагистральной территории при перевозке угля. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 1 (67). С. 18–26.
12. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование уноса угольной пыли. *Інформатика, управління та штучний інтелект. Матеріали третьої міжнарод. науково-техн. конф. студентів, магістрів та аспірантів*. Харків : НТУ «ХП», 2016. С. 6.
13. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Экологические проблемы транспортировки сыпучих грузов железнодорожным транспортом. *Диференціальні рівняння та проблеми аерогідромеханіки й тепломасо-переносу* : тези доп. Всеукраїнської наукової конф. (28-30 вересня 2016 р., Дніпро). Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т, 2016. С. 62.
14. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Теоретическое и экспериментальное исследование уноса угольной пыли. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки (частина II)* : матеріали II Міжнародної науково-практ. конф. (м. Київ, 29-30 листопада 2016 року). Київ : МЦНД, 2016. С. 15–16.
15. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Компьютерно-информационная система анализа уноса угольной пыли. *Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании* : тезисы X Международной научно-

практ. конф. (Днепр, 14-15 декабря 2016 г.). Днепр : ДИИТ, 2016. С. 90–91.

16. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Моделирование загрязнения окружающей среды при транспортировке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2016)* : матеріали II Всеукр. науково-техн. конф. з міжнародною участю (м. Дніпро, 1-3 листопада 2016 р.) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2016. С. 26–27.

17. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе, Гырало А. В. Прогнозирование уровня загрязнения рабочих зон возле железнодорожной магистрали. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер.: Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве*. Днепр : ГВУЗ «Приднепр. гос. акад. стр-ва и архитектуры», 2017. Вып. 98. С.61–67.

18. Беляєв Н. Н., Оладипо М. О., Кириченко П. С. Защита окружающей среды при транспортировке угля. Кривой Рог : Изд. : Р. А. Козлов, 2018. 92 с.

19. Беляєв Н. Н., Козачина В.А., Оладипо М. О. Защита атмосферного воздуха от загрязнения при перевозке угля: эксперимент, математическое моделирование. *79 Міжнародна науково-практична конференція «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту»*, 16-17.05.2019, Дніпро. Дніпро : ДНУЗТ, 2019. С. 293-294.

20. Беляєв Н. Н., Якубовская З.Н., Козачина В.А., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование загрязнения транспортного коридора при перевозке угля. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018)* : матеріали IV Міжнародної науково-техн. конф. «Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 р.) /

Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 38.

21. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
22. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
23. Вамболь С. О., Вамболь В. В., Кондратенко О. М., Міщенко І. В. Критеріальне оцінювання рівня екологічної безпеки процесу експлуатації енергетичних установок : монографія / НУЦЗ України. Харків : ФОП Бровін О.В., 2018. 320 с.
24. Вамболь С.О., Строков О. П., Вамболь В. В., Кондратенко О. М. Сучасні способи підвищення екологічної безпеки експлуатації енергетичних установок : монографія / НУЦЗ України. Харків : ФОП Бровін О. В., 2015. 212 с.
25. Воробйов Є. О., Ніколенко М. О., Худякова І. О. Запобігання забруднення повітря пилом під час транспортування вугілля. *Вісті АДД ДВНЗ «ДонНТУ»*. Горлівка, 2005. № 1. С. 34–38.
26. Генухович Е. Л. К вопросу о применимости гауссовой модели для расчета загрязнения воздуха. *Тр. ГГО*. 1982. Вып. 450. С. 35–40.
27. Голинько В. И. Рудничная пыль, динамика, контроль концентрации и пылеотложений. *Уголь Украины*. 1994. № 4. С. 58–59.
28. Голінко В.І., Савельєв Ю.В., Чеберячко І.М., Пустовий Д.С. Зниження концентрації дрібнодисперсного пилу при проходці гірничих виробок з використання енергії вибуху. *Зб. наук. пр. Нац. гірнич. ун-ту*. 2019. № 57. С. 169–178.
29. Гусев Н. Г., Беляев В. А. Радиоактивные выбросы в биосфере. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 257 с.
30. Закон України про охорону навколишнього природного середовища. *Відомості Верховної Ради (ВВР)*. 1991. № 41. Ст. 546.

31. Запорожець О. І. Проект концепції управління ризиками надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. *Безпека життєдіяльності*. 2007. № 4. С. 2–4.
32. Зберовский А. В. Математическое моделирование загрязнения атмосферы при аварийном выбросе химически опасного вещества. *Зб. наук. пр. Нац. гірнич. ун-ту*. 2012. № 37. С. 305–310.
33. 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.
34. Калабин Г. В., Бакланов А. А., Амосов П. В. Метод расчета аэрогазодинамики камерообразных выработок на основе математического моделирования. *ФТПРПИ*. 1990. № 1. С. 74–88.
35. Колесник В. Е., Головина Л. А., Богуцкая В. В. Математическое моделирование процесса рассеивания промышленной пыли в атмосфере. *Зб. наук. пр. Нац. гірнич. ун-ту*. 2006. № 26, т. 2. С. 120–130.
36. Колесник В. Е., Головина Л. А., Левченко М. В. Пылевой выброс вентилятора главного проветривания угольной шахты: экологическая опасность, способы снижения или локализация : монография. Днепропетровск : Нац. горн. ун-т, 2011. 125 с.
37. Кострюков В. А. Основы гидравлики и аэродинамики. Москва : Высшая шк., 1975. 220 с.
38. Кошик Ю. Й. Розробка технології боротьби з пилом при перевезенні гірничої маси залізничним транспортом : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кривий Ріг, 2003. 20 с.
39. Лаврентьев М. А. Проблемы гидродинамики и их математические модели. Москва : Наука, 1977. 407 с.
40. Логачев И. Н., Логачев К. И. Аэродинамические основы аспирации. Санкт-Петербург : Химиздат, 2005. 659 с.

41. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. Москва : Наука, 1978. 735 с.
42. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва : Наука, 1982. 320 с.
43. Беляев Н. Н., Якубовская З. Н., Козачина В. А., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование загрязнения транспортного коридора при перевозке угля. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2016)* : матеріали IV Міжнародної науково-техн. конф. « Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем» (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 р.) / Міністерство освіти і науки України, Державний вищий навчальний заклад «Український державний хіміко-технологічний університет». Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 38.
44. Оцінка ризику для здоров'я населення від забруднення атмосферного повітря : метод. рекомендації : наказ МОЗ України від 13.04.2007 р. № 184. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0184282-07#Text> (Accessed 05.09.2020).
45. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. Ленинград : Гидрометеоиздат, 1987. 93 с.
46. Озмидов Р. В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в океане. Москва : Наука, 1968. 204 с.
47. Оладипо М.О. Анализ загрязнения атмосферного воздуха при перевозке угля в полувагонах. Результаты лабораторных исследований и математического моделирования. *Науковий симпозіум «Тиждень еколога–2019»* (ДДТУ, Кам'янське, 7-10.10.2019). Кам'янське, 2019. С. 17.
48. Оладипо Мутиу Олатойе. Оценка уровня загрязнения воздушной среды возле железнодорожных магистралей с помощью информационной системы анализа уноса угольной пыли из вагонов.

Доклады междунар. научн. симпозиума «Неделя эколога – 2017», 10-13 апреля 2017 г. Каменское : ДГТУ, 2017. С. 35.

49. Оладипо Мутиу Олатойе. Экспертная оценка загрязнения рабочих зон при перевозке угля. *Материалы 77-й Международной научно-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта»*, 11-12 мая 2017 г., Днепр. Днепр : ДНУЖТ, 2017. С. 242.

50. Отделкин Н. С. Теоретические основы оценки потерь сыпучих грузов и защиты окружающей среды от пылеобразования при перегрузке и хранении в портах : дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 2009. 301 с.

51. Пененко В. В., Алоян А. Е. Модели и методы для задач охраны окружающей среды. Новосибирск : Наука, 1985. 257 с.

52. Пляцук Л. Д., Бойко В. В. Аналіз методів математичного моделювання розповсюдження забруднюючих речовин в атмосфері. *Вісн. КНУ імені Михайла Остроградського*. 2010. Вип. 6. С. 1–4.

53. Полянин А. Д., Вязмин А. В., Журов А. И., Казенин Д. А. Справочник по точным решениям уравнений тепло- и массопереноса. Москва : Факториал, 1998. 368 с.

54. Пономарьова С. Д., Юрченко В. О., Аксьонова О. Ф. Розсіювання дрібнодисперсного пилу кондитерського підприємства за межами санітарно-захисної зони. *Харчова наука і технологія*. 2018. Вип. 1 (27). С. 344 – 355.

55. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. Москва : Мир, 1980. 616 с.

56. Рудаков Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельефом. *Вісн. ДНУ. Сер.: Механіка*. 2004. Вип. 8. № 6. т. 1. С. 89–97.

57. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование. Москва : Физматлит, 2001. 320 с.

58. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.

59. 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.
60. Способы и средства борьбы с пылью на добычных участках угольных шахт. Экспресс-информ / ЦНИЭИуголь. Москва, 1978. 40 с.
61. Степаненко С. Н., Волошин В. Г., Типцов С. В. Решение уравнения турбулентной диффузии для стационарного точечного источника. *Український гідрометеорологічний журн.* 2008. № 3. С. 13–24.
62. Уорк К., Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. Москва : Мир, 1980. 539 с.
63. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. Київ: Наук. думка, 1997. 368 с.
64. Шмандий В.М. Научно-методические принципы исследования состояний техногонной безопасности в регионе. *Вісник КДПУ.* 2002. Вип. 5(16). С. 19–24.
65. Alan J. Cimorelli et al. Aermoc: Description Of Model Formulation / EPA-454/R-03-004, September, 2004. P. 91.
66. Alvarez J. T., Alvarez I. D.&Lougedo S. T. Dust barriers in open pit blasts. Multifase Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations. *WIT Transactions on Ecology and the Environment, Air Pollution XVI*, Vol 116. 2008. P. 85-93.
67. Aurizon. *South West System Coal Dust Management Plan*. URL: <https://www.aurizon.com.au/-/media/project/aurizon/files/sustainability/south-west-system---coal-dust.pdf> (Last accessed: 20.07.2020)
68. Belayev N. N., Khrutch V. K. An engineering approach to simulate the 3-d wind flows over buildings. *Proceedings of the Fourth Intern. Colloquium on Bluff Body Aerodynamics & Applications*, Ruhr-Universitat. Volume of Abstracts. Bochum (Germany), Sept. 11–14, 2000. P. 471–475.

69. Best Practices for Dust Control in Coal Mining. *Information Circular/* Jay F. Colinet et al, IC 9517, Department of Health and Human Services, Pittsburgh, PA, Spokane, WA, January 2010. 30 p.
70. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*, Springer, 2012. P. 87–91.
71. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Dust from coal trains: reducing of environmental pollution in work places near railway. *Науковий вісн. будівництва*. 2017. № 2 (88), С. 268–271.
72. Biliaiev M. M, Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. *East European Scientific Journal*. 2019. Vol 3(43). P. 10–15.
73. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Reducing of environmental pollution during coal transportation. *Collection of Research Papers of National Mining University*. 2017. № 52. P. 325–329.
74. BNSF Railway Company and United Pacific Railroad Company (UP). *Summary of BNSF/UP Super Trial 2010*. Online resource: <http://www.bnsf.com/customers/pdf/coal-super-trial.pdf> (Last accessed: 01.08.2020)
75. 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/#> (Last accessed: 16.08.2020)
76. 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.
77. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study B.

Fabiano, F. CurrT, A. P. Reverberi, E. Palazzi. *Process Safety and Environmental Protection*. 2014. 92. P. 150–159.

78. 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](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).

79. Dust Control Hand Book for Industrial Mineral Mining and Processing / Andrew B. Cecala et al, DHHS (NIOSH). Pittsburg, PA, 2012. № 112. P.186.

80. 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

81. 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.

82. 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

83. Final Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain. *NSW Chief Scientist & Engineer*. August, 2016. URL: https://www.chiefscientist.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0008/89864/160805-FINAL-Coal-Dust-Report.pdf (Last accessed: 06.08.2020)

84. Franc de Bree Diffuse PM10 Emission Measurements Some Case Studies. URL: http://buroblauw.nl/wp-content/uploads/2008/11/debree_nl_abs_diffusive_pm10_em.pdf (Last accessed: 04.09.2020).

85. Hanna S. Air Quality Modelling over Short Distances. *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling*. 1994. 16 May–3 June. № SMR/760–2. P. 712–743.
86. Hanna S., Chang J. Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) Improvements and Testing. *College on Atmospheric Boundary Layer and Air Pollution Modelling*. 1994. 16 May–3 June. № SMR/760–4. P. 1491–1508.
87. Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain November 2015.
88. 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.
89. Literature Review of Coal Train Dust Management Practices. *NSW Environment Protection Authority*. Milton, Australia. 1 December 2014. 112 p.
90. Model Evaluation Report on UDM Version 6.0. Cambridge Research Consultants Ltd., Cambridge CB2 1SJ UK, Ref. No. SMEGIS/00/9/E, 2002. P. 51.
91. Modeling of the atmosphere pollution from coal trains / Mykola Biliaiev, et al. *MATEC Web of Conf. EOT-2019*. Lviv, 2019. Vol. 294. 6 p. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929402007>
92. 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.
93. Murakami S., Mochida A., Yoshihiko H. Comparison of “ $k-\varepsilon$ ” 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.
94. Nozawa K., Tamura T. Large eddy simulation of the flow around a low-rise building immersed in a rough – wall turbulent boundary layer. *Proceedings of 3rd European & African Conference on Wind Engineering*.

Eindhoven University of Technology. The Netherlands. 2001. July 2–6. P. 185–192.

95. NSW EPA. (2014a). Environment compliance report: Compliance audit of coal train loading and unloading facilities. NSW Environment Protection Authority. Retrieved from <https://www.epa.nsw.gov.au/-/media/epa/corporate-site/resources/epa/148597-comp-audit-coal-train.pdf> (Last accessed: 13.08.2020).

96. QR Network, *Coal Dust Management Plan*, Coal Loss Management Project, Version DRAFT V10D, Date: 23rd May 2019. URL: <https://www.aurizon.com.au/-/media/project/aurizon/files/sustainability/coal-dust-management-plan-revised-2019---for-consultation.pdf> (Last accessed: 17.07.2020)

97. Qu Y., Millez M., Musson-Genon L., Carrissimo B. Development of building resolving atmospheric CFD code taking into account atmospheric radiation in complex geometric. *Conference Abstracts of 31st NATO / SPS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application*, 27 September–01 October, Torino, Italy. 2010. № P. 1.5.

98. Reed W. R. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. *DHHS (NIOSH) Publication*. Pittsburgh, PA, 2005. 138. P. 24.

99. De Faveri et al. Reduction of the environmental impact of coal storage piles: a wind tunnel study. *Atmosph. Env.* Vol. 24A, No. 11. Pp. 2787-2793.

100. Review of Dust from Coal Trains in Queensland, report to Senate Standing Committee on Community Affairs Inquiry: "The impact on health of air quality in Australia", Queensland Resources Council, March 2013, Prepared by Katestone Environmental Pty Ltd, Australia 4064. URL: <http://www.aph.gov.au/DocumentStore.ashx?id=9f473c91-f005-43bf-9a2b-a0c67d277115> (Last accessed: 23.09.2020).

101. 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.

102. Robert Kotchenruther. Fugitive Dust from Coal Trains^ Factors Effecting Emissions & Estimating PM_{2.5}, *EPA Region 10, NW –AIRQUEST*, 2013. URL: http://lar.wsu.edu/nw-airquest/docs/201306_meeting/20130606_Kotchenruther_coal_trains.pdf (Last accessed: 20.08.2020)
103. The Senate. Community Affairs Committee Secretariat. Impacts on health of air quality in Australia – August 2013, Commonwealth of Australia, Parliament House, Canberra, URL: https://www.aph.gov.au/parliamentary_business/committees/senate/community_affairs/completed_inquiries/2010-13/airquality/report/~media/wopapub/senate/committee/clac_ctte/completed_inquiries/2010-13/air_quality/report/report.aspx (Last accessed: 17.07.2020)
104. 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.
105. Storms B., Salari K. and Babb A. Fuel Savings and Aerodynamic Drag Reduction from Rail Car Covers, US Department of Energy – Office of Heavy Vehicle Technology. 2010. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090026079/downloads/20090026079.pdf> (Last accessed: 27.08.2020)
106. South West System Coal Dust Management Plan. 2013. November. Australia, 48 p.
107. The Human Health Effects of Rail Transport of Coal Through Multnomah County, Oregon. A Health Analysis and Recommendations for Further Action, February 2013.
108. 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.

ДОДАТОК А

Тестові розрахунки

Нижче наведено результати тестових розрахунків, що підтверджують адекватність побудованих чисельних моделей. Для виконання цих розрахунків обрані відомі в науковій літературі тестові задачі.

Тестова задача 1. Для тестування чисельного методу, що використовується для розв'язання двовимірного рівняння (3.12), використовується аналітичний розв'язок першої крайової задачі для нестационарного рівняння теплопровідності, яке за виглядом збігається з рівнянням (3.12), при значенні коефіцієнта $a=1$ [53]. Умови задачі: задана прямокутна область, де початкова температура дорівнює 400°C . Розрахунок проводиться для області: $20\text{ м} \times 15\text{ м}$. На границях області для температури поставлена гранична умова: $T_0 = 0^\circ\text{C}$. Розрахунком визначається значення температури в точці: $x = 1\text{ м}$, $y = 1\text{ м}$ для різних моментів часу.

Процес зміни температури в області описується таким рівнянням (аналітичний розв'язок) [53]:

$$T = T_0 \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right) \operatorname{erf}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right).$$

У табл. А.1 наведено дані розрахунку температури за розробленою чисельною моделлю та на основі аналітичного розв'язку.

Таблиця А.1 – Розрахункові значення температури

Час t , с	Аналітичний розв'язок	Чисельна модель
2	$54,76^\circ\text{C}$	$55,11^\circ\text{C}$
4	$29,16^\circ\text{C}$	$29,23^\circ\text{C}$
6	$19,71^\circ\text{C}$	$20,12^\circ\text{C}$

Як видно з наведеної таблиці, спостерігається задовільне узгодження чисельних результатів і аналітичного розв'язання задачі.

Тестова задача 2. Розглядається перша крайова задача для тривимірного рівняння теплопровідності, що має вигляд (3.14). Для прямокутної області це рівняння має аналітичний розв'язок [53] за таких умов: визначення температури в області $0 \leq x < \infty$, $0 \leq y < \infty$, $0 \leq z < \infty$ за граничних умов $T = 0$ °С на границях $x = 0$, $y = 0$, $z = 0$ і за початкової умови $T = T_0$, де $T_0 = 300$ °С. Моделююче рівняння для цієї задачі має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Як ми бачимо, це рівняння аналогічно рівнянню для потенціалу швидкості (3.14). Аналітичний розв'язок цієї задачі записується так [53]:

$$T = T_0 \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{at}} \right) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{y}{2\sqrt{at}} \right) \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{z}{2\sqrt{at}} \right).$$

Розрахунок виконується для точки: $x = 1$ м, $y = 1$ м. Розміри розрахункової області: 12 м x 12 м x 12 м.

У табл. А.2 наведено дані розрахунку температури за розробленою чисельною моделлю й на основі аналітичного розв'язку для випадку, коли коефіцієнт температуропровідності $a = 1$.

Таблиця А.2 – Значення температури в точці для різних моментів часу

$T, \text{с}$	Аналітичний розв'язок	Чисельний розв'язок
2	15,19 °С	15,24 °С
4	5,90 °С	6,01 °С
6	3,28 °С	3,33 °С

Порівнюючи дані, наведені в табл.А.2, бачимо, що наявне їх задовільне узгодження.

Тестова задача 3. Розглядається тестова задача з роботи [2]: розсіювання пасивної домішки з точкового джерела емісії. Аналітичний розв'язок цієї задачі записується так [2, 22]:

$$C = \frac{M}{4\pi x \sqrt{k_y k_z}} \exp\left(-\frac{Wy^2}{4k_y x}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{W(z+H)^2}{4k_z x}\right] + \exp\left[-\frac{W(z-H)^2}{4k_z x}\right] \right\}.$$

Вихідні дані [2]: $W = 4$ м/с; $K_y = 500$ м²/с; $Y = 0$; $H = 120$ м; $Z = 120$ м - розрахунковий рівень; $M = 106$ мг/с; $K_z = 5$ м²/с.

Значення концентрації домішки на різній відстані від джерела наведені в табл. А.3.

Таблиця А.3 – Значення концентрації домішки

X, км	1	2	3	4
Z, мг/м ³ (аналітичний розв'язок) [2]	1,59	0,79	0,54	0,42
Z, мг/м ³ (розрахунок за розробленою моделлю/розрахунок за схемою Кранка – Ніколсона [2])	1,75 / 1,8	0,86 / 0,9	0,58 / 0,6	0,47 / 0,5

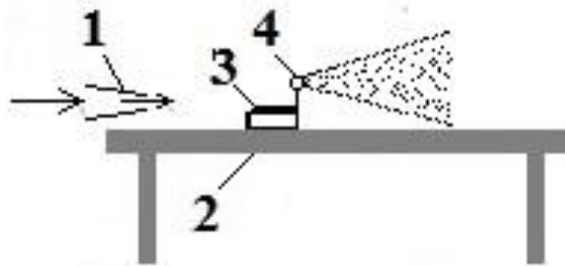
Аналізуючи дані з табл. А.3, бачимо, що наявне задовільне узгодження результатів.

Тестова задача 4. Відомо, що розсіювання іонів у повітряному середовищі стосується задачі масопереносу домішки, тому для верифікації розробленої чисельної моделі (3D модель потенційної течії й рівняння масопереносу) було виконано фізичний експеримент, який полягав у тому, що вимірювалася концентрація негативних іонів від іонізатора, який

розміщувався на моделі напіввагона. Далі виконувався розрахунок на основі створеної чисельної моделі й порівнювалися дослідні й числові результати.

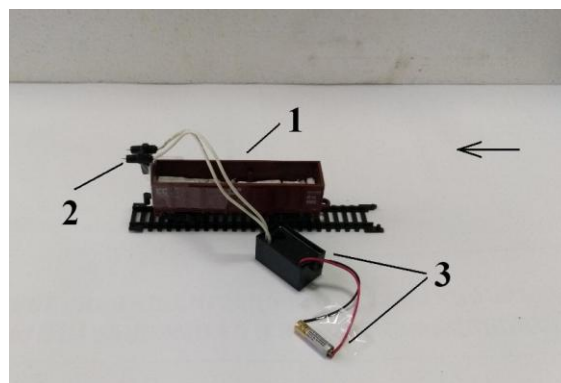
Схема дослідної установки показана на рис. А. 1. Модель напіввагона була виготовлена в масштабі 1:100. На торцевій стінці моделі (на висоті $h = 5$ см) розміщувався іонізатор AirNASA KJF03, інтенсивність емісії становила 10×10^6 частинок/с. Потік повітря створювався за рахунок роботи повітродувки, швидкість повітряного потоку залишала 0.47 – 0.54 м/с. Для вимірювання швидкості повітряного потоку використовувався анемометр GM 8908. У розрахунках приймалася швидкість 0.5 м/с.

Вимірювання кількості негативних іонів виконувалося за допомогою лічильника AIR ION TESTER KT-401. Концентрація іонів вимірювалася на висоті 5 см і на різній відстані від торцевої стінки моделі.



1 – повітродувка; 2 – стіл; 3 – модель напіввагона; 4 – іонізатор

Рисунок А.1 – Схема дослідної установки



1 - модель напіввагона; 2 - сопло іонізатора повітря; 3 - блок живлення

Рисунок А.2 – Загальний вигляд дослідної установки

Результати вимірювань і розрахунку показані в табл. А.4.

Таблиця А.4 – Експериментальне й розрахункове значення концентрації іонів

Відстань, x	Експеримент	Розрахункове значення
6 см	$(1,39-1,45) \times 10^4$ іон / см^3	$1,43 \times 10^4$ іон / см^3
9 см	$(1,29-1,35) \times 10^4$ іон / см^3	$1,31 \times 10^4$ іон / см^3
18 см	$(1,17-1,26) \times 10^4$ іон / см^3	$1,13 \times 10^4$ іон / см^3

Дані з табл. А. 4 показують, що наявне задовільне узгодження між експериментальними й розрахунковими даними.

ДОДАТОК Б

Документи про впровадження результатів дисертації

Міністерство освіти і науки України
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з науково-педагогічної,
економічної роботи, перспективного та
іноваційного розвитку
д.т.н., проф. Радкевич А.В.

«12» 09 2019 р.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи Оладіпо Мутіу Олатойе

Чинним актом підтверджується те, що результати дисертаційної роботи аспіранта Оладіпо Мутіу Олатойе використовуються в навчальному процесі Дніпровського національного університету імені академіка В. Лазаряна при підготовці студентів, які навчаються за спеціальністю «Будівництво та цивільна інженерія». Матеріали дисертаційної роботи, алгоритми та пакети програм використовуються при проведенні лекційних та практичних занять з дисциплін «Охорона природного середовища від забруднення промисловими підприємствами», «Екологічна безпека», що дозволило підвищити ефективність навчального процесу та якість викладання матеріалу при вивченні вказаних дисциплін.

Начальник навчального відділу

Л.С. Андрашко

Зав. каф. «Гідраліка та
водопостачання», д.т.н., проф.

М.М. Біляев

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ТОВ «Енергосервіс-КР»
 Ольферт О.Ю.
 « 16 »



АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи Оладіпо Мутіу Олатойе

В дисертаційній роботі Оладіпо Мутіу Олатойе розроблено методи зменшення рівня забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля в напіввагонах. В дисертаційній роботі розроблені математичні моделі та спеціалізоване програмне забезпечення для оцінки ефективності використання додаткових спеціальних бортів, що встановлюються на борта вагонів для зменшення виносу вугільного пилу. Ці математичні моделі побудовані на фундаментальних рівняннях аеродинаміки та масопереносу. Запропоновані математичні моделі дозволяють прогнозувати динаміку забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля в напіввагонах. Особливістю розроблених моделей є те, що вони враховують швидкість руху потягу, геометричну форму додаткових бортів, атмосферну дифузію, вплив локальної швидкості повітря на інтенсивність виносу вугільного пилу. Тобто побудовані моделі враховують такі важливі параметри, що не враховуються в існуючих моделях, які використовуються для оцінки рівня забруднення атмосферного повітря при транспортуванні вугілля в напіввагонах.

Розроблені математичні моделі, пакети програм та запропоновані методи зменшення виносу вугільного пилу з напіввагонів було використано в ТОВ «Енергосервіс-КР» при розробці технології захисту атмосферного повітря від забруднення при транспортуванні залізної руди та вугілля.

директор
 ТОВ «Енергосервіс-КР»



Ольферт О.Ю.

ДОДАТОК В
СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ

Статті в наукових фахових виданнях України

1. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Минимизация интенсивности выноса пыли из полувагона при транспортировке угля. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті* : Науковий журн. 2016. № 11. С. 93–100. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
2. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Модели оценки уровня загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 5 (65). С. 22–29. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
3. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Проблема уноса угольной пыли. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 6 (66). С. 17–24. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
4. Беляев Н. Н., Оладипо М. О. Расчет динамики загрязнения примагистральной территории при перевозке угля. *Наука та прогрес транспорту. Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2016. Вип. 1 (67). С. 18–26. (Видання включено до міжнародної наукометричної бази *Index Copernicus*).
5. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Reducing of environmental pollution during coal transportation. *Collection of Research Papers of National Mining University*. 2017. № 52. P. 325–329.
6. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Dust from coal trains: reducing of environmental pollution in work places near railway. *Науковий вісн. будівництва*. 2017. № 2 (88). С. 268–271.

7. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе, Гыркало А. В. Прогнозирование уровня загрязнения рабочих зон возле железнодорожной магистрали. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Сер.: Энергетика, экология, компьютерные технологии в строительстве.* 2017 . Вып. 98. С. 61–67.

- монографія:

8. Беляєв Н. Н., Оладипо М. О., Кириченко П. С. Защита окружающей среды при транспортировке угля. Кривой Рог : Изд.: Р. А. Козлов, 2018. 92 с.

Статті у закордонних наукових періодичних виданнях:

9. Biliaiev M. M., Kozachyna V. A., Oladipo M. O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. *East European Scientific Journal.* 2019. Vol 3(43). P. 10–15.

10. Modeling of the atmosphere pollution from coal trains / Mykola Biliaiev, Vitalii Kozachyna, Viktorolaiia Biliaieva, Mutiu Olatoye Oladipo and Kateryna Chernyatyeva. *MATEC Web of Conf. EOT-2019.* Lviv, 2019. Vol. 294. 6 p. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201929402007>

Публікації у виданнях, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

11. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование уноса угольной пыли. *Информатика, управління та штучний інтелект. Матеріали третьої міжнарод. науково-техн. конф. студентів, магістрів та аспірантів.* Харків : НТУ «ХП», 2016. С. 6.

12. Беляєв Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Экологические проблемы транспортировки сыпучих грузов железнодорожным транспортом. *Диференціальні рівняння та проблеми аерогідромеханіки й тепломасопереносу : тези доп. Всеукр. наук. конф. (28-30 вересня 2016 р., Дніпро).* Дніпро : Дніпропетр. нац. ун-т, 2016. С. 62.

13. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Теоретическое и экспериментальное исследование уноса угольной пыли. *Теоретичні та практичні аспекти розвитку науки (частина II) : матеріали II Міжнародної науково-практ. конф.* (м. Київ, 29-30 листопада 2016 року). Київ : МЦНД, 2016. С. 15–16.

14. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Компьютерно-информационная система анализа уноса угольной пыли. *Современные информационные и коммуникационные технологии на транспорте, в промышленности и образовании : тезисы X Международной научно-практ. конф.* (Днепр, 14-15 декабря 2016 г.). Днепр : ДИИТ, 2016. С. 90–91.

15. Беляев Н. Н., Оладипо Мутиу Олатойе. Моделирование загрязнения окружающей среды при транспортировке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2016) : матеріали II Всеукр. науково-техн. конф. з міжнародною участю* (м. Дніпро, 1-3 листопада 2016 р.). Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2016. С. 26–27.

16. Оладипо М. О. Оценка уровня загрязнения воздушной среды возле железнодорожных магистралей с помощью информационной системы анализа уноса угольной пыли из вагонов. *Международный научный симпозиум «Неделя эколога – 2017»* (ДДТУ, Каменское, 10-13.04.2017). Каменское, 2017. С.35.

17. Беляев Н. Н., Якубовская З. Н., Козачина В. А., Оладипо Мутиу Олатойе. Математическое моделирование загрязнения транспортного коридора при перевозке угля. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (КМОСС-2018) : матеріали IV Міжнародної науково-техн. конф.* (м. Дніпро, 1-2 листопада 2018 р.). Дніпро : ДВНЗ УДХТУ, 2018. С. 38.

18. Беляев Н. Н., Козачина В. А., Оладипо М. О. Защита атмосферного воздуха от загрязнения при перевозке угля: эксперимент, математическое моделирование. *79-та Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та*

перспективи розвитку залізничного транспорту», 16-17.05.2019, Дніпро. Дніпро : ДНУЗТ, 2019. С. 293–294.

19. Оладипо М. О. Экспертная оценка загрязнения рабочих зон при перевозке угля. *77-ма Міжнародна науково-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту», 11-12.05.2017, Дніпро. Дніпро: ДНУЗТ, 2017. С. 252.*

20. Оладипо М. О. Анализ загрязнения атмосферного воздуха при перевозке угля в полувагонах. Результаты лабораторных исследований и математического моделирования. *Науковий симпозіум «Тиждень еколога – 2019» (ДДТУ, Кам'янське, 07-10.10.2019). Кам'янське, 2019. С. 17.*