

УДК 519.6

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАБОЧИХ ЗОН ВОЗЛЕ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ МАГИСТРАЛИ

БЕЛЯЕВ Н. Н.<sup>1</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ОЛАДИПО МУТИУ ОЛАТОЙЕ<sup>2\*</sup>, *асп.*,  
ГЫРКАЛО А. В.<sup>3\*</sup>, *студ.*,

<sup>1</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: Oladipo.toye@outlook.com, ORCID ID 0000-0001-7945-6657

<sup>3</sup> Кафедра «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, 49010, Днепропетровск, Украина, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-5578-0516

**Аннотация.** *Цель.* Разработка CFD модели для оценки уровня загрязнения воздушной среды в рабочих зонах возле железнодорожной магистрали при транспортировке угля. *Методика.* Для решения задачи разработана CFD модель, основанная на применении уравнений движения невязкой несжимаемой жидкости и массопереноса, для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагона и в рабочей зоне вблизи железнодорожной магистрали. Для численного интегрирования уравнения переноса угольной пыли использовалась неявная попеременно-треугольная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется расщепление уравнения переноса, что позволяет построить эффективный алгоритм решения дифференциальной задачи. Неизвестное значение концентрации угольной пыли на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета, что обеспечивает простую численную реализацию уравнений расщепления. Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости применяется метод Рундсона. Разработанные численные модели составляют основу созданного пакета прикладных программ. На основе построенных численных моделей проведен 3D вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы при сносе угольной пыли из полувагона. *Результаты.* Разработана 3D численная модель, которая относится к классу «diagnostic models». Данная модель учитывает основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания угольной пыли в рабочей зоне вблизи железнодорожной магистрали при транспортировке угля. Предложенная модель требует небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Данная модель может быть использована для проведения расчетов по оценке влияния различных факторов на уровень загрязнения рабочих зон вблизи железнодорожной магистрали. Выполнены расчеты по определению концентрации угольной пыли в рабочей зоне возле железнодорожного вагона. Представлены результаты лабораторного эксперимента по исследованию формирования зон загрязнения возле модели вагона. *Научная новизна.* Создана CFD модель, позволяющая учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания угольной пыли в рабочих зонах возле железнодорожной магистрали. *Практическая значимость.* Рассмотрена эффективная CFD модель для экспресс расчета уровня загрязнения воздушной среды в рабочих зонах возле железнодорожной магистрали при перевозке угля. Модель может быть применена при разработке мероприятий по защите работников прилегающей территории от пылевого загрязнения. Предложенная модель позволяет рассчитать 3D аэродинамику воздушного потока и процесс рассеивания угольной пыли на прилегающей территории.

*Ключевые слова:* загрязнение атмосферы; железнодорожный транспорт; перевозка угля; численное моделирование, вынос угольной пыли из вагона

## ПРОГНОЗУВАННЯ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ РАБОЧИХ ЗОН БІЛЯ ЗАЛІЗНИЧНОЇ МАГІСТРАЛІ

БІЛЯЄВ М. М.<sup>1</sup>, *д.т.н, проф.*,  
ОЛАДИПО МУТИУ ОЛАТОЕ<sup>2\*</sup>, *асп.*,  
ГИРКАЛО О. В.<sup>3</sup>, *студ.*,

<sup>1</sup> Кафедра «Гидравлика та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Кафедра «Гидравлика та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: Oladipo.toye@outlook.com, ORCID ID 0000-0001-7945-6657

<sup>3</sup> Кафедра «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпропетровськ, Україна, тел. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-5578-0516

**Анотація. Мета.** Розробка CFD моделі для оцінки рівня забруднення повітряного середовища в робочих зонах біля залізничної магістралі при транспортуванні вугілля. **Методика.** Для розв'язання задачі розроблена CFD модель, заснована на застосуванні рівнянь руху невязкої нестисливої рідини і масопереносу, для визначення поля швидкості вітрового потоку поблизу вагона і в робочій зоні поблизу залізничної магістралі. Для чисельного інтегрування рівняння переносу вугільного пилу використовувалася неявна попеременно-трикутна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється розщеплення рівняння переносу, що дозволяє побудувати ефективний алгоритм розв'язання диференціальної задачі. Невідоме значення концентрації вугільного пилу на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу біжучого рахунку, що забезпечує просту чисельну реалізацію рівнянь розщеплення. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості застосовується метод Річардсона. Розроблені чисельні моделі складають основу створеного пакета прикладних програм. На основі побудованих чисельних моделей проведено 3D обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення атмосфери при знесенні вугільного пилу з піввагона. **Результати.** Розроблено 3D чисельну модель, яка відноситься до класу «diagnostic models». Дана модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання вугільного пилу в робочій зоні поблизу залізничної магістралі при транспортуванні вугілля. Запропонована модель вимагає невеликих витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої і середньої потужності. Дана модель може бути використана для проведення розрахунків з оцінки впливу різних чинників на рівень забруднення робочих зон поблизу залізничної магістралі. Виконано розрахунки по визначенню концентрації вугільного пилу в робочій зоні біля залізничного вагона. Представлені результати лабораторного експерименту по дослідженню формування зон забруднення біля моделі вагона. **Наукова новизна.** Створена CFD модель, що дозволяє врахувати істотні фактори, що впливають на процес розсіювання вугільного пилу в робочих зонах біля залізничної магістралі. **Практична значимість.** Розглянута ефективна CFD модель для експрес розрахунку рівня забруднення повітряного середовища в робочих зонах біля залізничної магістралі під час перевезення вугілля. Модель може бути застосована при розробці заходів щодо захисту працівників приміагстральної території від пилового забруднення. Запропонована модель дозволяє розрахувати 3D аеродинаміку повітряного потоку і процес розсіювання вугільного пилу на приміагстральній території.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери; залізничний транспорт; перевезення вугілля; чисельне моделювання, винос вугільного пилу з вагона

## PREDICTION OF THE AIR POLLUTION IN WORKPLACES NEAR RAILWAYS

BILIAIEV M. M. <sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
OLADIPO MUTIU OLATOYE <sup>2\*</sup>, *postgraduate*,  
GYRKALO O. V. <sup>3</sup>, *stud.*,

<sup>1</sup> Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup> Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +38(056) 373-15-09, e-mail: Oladipo.toye@outlook.com, ORCID ID 0000-0001-7945-6657

<sup>3</sup> Department of «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, 2, Lazaryan St., Dnipropetrovsk, 49010, Ukraine, tel. +38(056) 373-15-09, e-mail: gidravlika2013@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-5578-0516

**Abstract. Purpose.** Development of a CFD model for estimating the level of air pollution in the working areas near the railroad during coal transportation. **Methodology.** To solve the problem, a CFD model based on the application of the equations of motion of inviscid incompressible fluid and mass transfer has been developed to determine the velocity field of the wind flow near the wagon and in the working area near the railway line. For numerical integration of the coal dust transfer equation, an implicit alternating-triangular difference scheme was used. When constructing a difference scheme, the transport equation is split, which makes it possible to construct an effective algorithm for solving a differential problem. The unknown value of the concentration of coal dust at each step of the splitting is determined by the explicit scheme – the running counting method, which ensures a simple numerical realization of the splitting equations. For the numerical integration of the equation for the velocity potential, the Richardson method is applied. The developed numerical models form the basis of the created package of applied programs. Based on the constructed numerical models, a 3D computational experiment was performed to estimate the level of atmospheric pollution during the removal of coal dust from a wagon. **Findings.** A 3D numerical model has been developed that belongs to the class of "diagnostic models". This model takes into account the main physical factors that affect the process of dispersal of coal dust in the work area near the railway line during the transportation of coal. The proposed model requires a small amount of computer time in practical implementation on small and medium power computers. This model can be used to perform calculations to assess the influence of various factors on the level of contamination of working areas near the railroad. Calculations have been performed to

determine the concentration of coal dust in the working area near the railway car. The results of a laboratory experiment on the study of the formation of contamination zones near the car model are presented. **Originality.** A CFD model has been created that allows to take into account the significant factors that influence the process of coal dust dispersion in working areas near the railway main **Practical value.** An effective CFD model for the express calculation of the level of air pollution in working areas near the railway line for the transportation of coal is considered. The model can be applied to the development of measures to protect workers of the mainland from dust pollution. The proposed model allows to calculate the 3D aerodynamics of the air flow and the process of scattering of coal dust on the mainland territory.

*Keywords:* air pollution; railway transport; transportation of coal; numerical modeling, removal of coal dust from the wagon

## Введение

В Нигерии осуществляется интенсивная добыча и транспортировка угля железнодорожными вагонами.

Однако известно, что транспортировка угля в полувагонах приводит к большой проблеме, а именно - формированию концентрационного поля пыли над вагоном, в транспортном коридоре и в рабочих зонах, прилегающих к магистрали. В этих рабочих зонах находятся различные работники – монтеры пути, сигналисты и т.д. (рис.1). При транспортировке в условиях жаркого климата Нигерии происходит быстрая потеря влаги в грузе, находящемся в полувагоне, снижение сил адгезии между частицами угля. Поэтому во время транспортировки происходит вынос мелкодисперсных фракций угольной пыли, которые в зарубежной литературе получили название «fugitive dust».



Рис. 1. Монтер пути возле железнодорожной магистрали /

*Worker near railway*

В рамках данной проблемы, обычно выделяют такие задачи: прогнозирование уровня загрязнения рабочих зон вблизи железнодорожной магистрали и создание методов по минимизации такого пылевого загрязнения. Для решения первой задачи используются модель Гаусса [5-7], реализованная в виде специализированных пакетов программ типа «AERMOD», «CULPUF». Модель Гаусса не учитывает ряд важных факторов, которые существенно влияют на формирование концентрационного поля пыли в рабочих зонах возле железнодорожной магистрали. Эта модель не учитывает профиль скорости ветра, влияние самого вагона на формирование локального

аэродинамического режима, форму насыпи сыпучего груза в полувагоне и т.д.

Поэтому возникает важная задача по созданию современных моделей, класса CFD (computational fluid dynamics), которые позволяли бы осуществлять оценку уровня пылевого загрязнения рабочих зон возле железнодорожной магистрали при транспортировке угля.

## Цель

Целью данной работы является разработка CFD модели для прогноза уровня пылевого загрязнения рабочих зон возле железнодорожной магистрали при перевозке угля. Основное требование к создаваемой модели – учет основных физических факторов при моделировании и малые затраты компьютерного времени при практической реализации.

## Математическая модель

Для решения поставленной задачи применяется уравнение для потенциала скорости (модель течения невязкой жидкости):

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – потенциал скорости, ось  $Z$  направлена вертикально вверх (рис.2).

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются по зависимостям:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad w = \frac{\partial \varphi}{\partial z}. \quad (2)$$

Постановка краевых условий для данного уравнения рассматривается в работах [1,2,4].

После определения поля скорости воздушного потока возле полувагона, на втором этапе, решается задача о переносе пылевых загрязнений из полувагона в атмосферу. Для построения наиболее общей математической модели будем использовать фундаментальное уравнение массопереноса. [1,2,5,8,11,12]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (3)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель);  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости воздушного потока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y, \mu_z)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя от «насыпи» в полувагоне;  $\delta(x - x_i)\delta(y - y_i)\delta(z - z_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты источника выброса;  $w_g$  – скорость гравитационного оседания пыли;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1,2,8].

В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и вертикального коэффициента атмосферной диффузии [5,6]:

$$u = u_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^p, \quad \mu_z = k_1 \left( \frac{z}{z_1} \right)^m, \quad \mu_x = \mu_y = k_0 u, \quad (4)$$

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $z_1$  (принимается  $z_1 \approx 10 \text{ м}$ );  $k_1 = 0,2$ ;  $k_0 = 0,1$ ;  $p = 0,16$ ;  $m \approx 1$ .

Численное интегрирование уравнений модели выполняется на прямоугольной разностной сетке. При формировании расчетной области используется метод маркирования [1,2]. С помощью маркеров задается, положение железнодорожного вагона, форма «насыпи» сыпучего груза в полувагоне (рис.2).

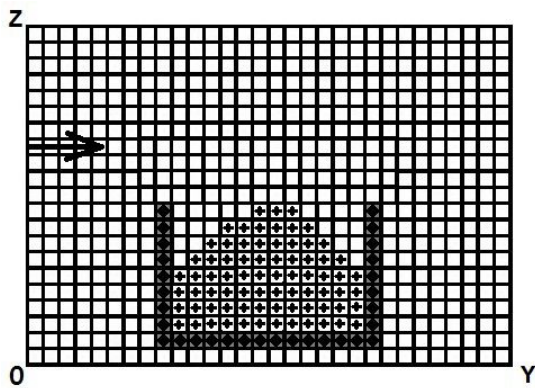


Рис. 2 – Принцип маркирования расчетной области на разностной сетке (задание формы вагона и формы груза в вагоне, сечение  $x = \text{const}$ ) ■ – маркер границы вагона; + – маркер границы груза (угля) / Sketch of computational region and markers application: 1 ■ – boundaries of wagon; + – cargo

Для решения моделирующих уравнений (1), (3) используется метод сеток. Уравнение для потенциала скорости численно интегрируется с помощью метода Либмана [9]. Предварительно проводится следующая осуществляется аппроксимация производных:

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

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

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

где  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$  – шаг разностной сетки в направлении OX, OY, OZ соответственно.

С учетом этого, в разностном виде уравнение Лапласа можно записать так:

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

Отсюда можно определить искомую величину

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

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

Расчет по данной формуле прекращается при выполнении условия

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

где  $n$  – номер итерации (количество шагов по «времени»);  $\varepsilon$  – малое число (величина порядка 0,001).

После расчета поля потенциала компоненты вектора скорости воздушного потока на гранях разностных ячеек рассчитываются по формулам:

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

$$w_{i,j,k} = \frac{P_{i,j,k} - P_{i,j,k-1}}{\Delta z}.$$

После расчета компонент вектора скорости осуществляется численное интегрирование трехмерного уравнения массопереноса. Для численного интегрирования уравнения массопереноса (3) применяется неявная разностная схема расщепления [1-3,11,12]. На каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации пыли находится по методу бегущего счета. Это позволяет получить простой алгоритм для расчета концентрационного поля пыли вблизи полувагона.

На основе построенных численных моделей создана CFD, реализованная виде пакета прикладных программ («generic model»).

Время расчета аэродинамической задачи и задачи массопереноса составляет порядка 10 сек.

### Результаты

Пример практического использования разработанных численных моделей показан ниже. Рассматривался 3D моделирование процесса сдува угольной пыли из полувагона, транспортирующего уголь (рис.3). Отметим, что ось X направлена вдоль вагона. Целью расчета являлась оценка размеров, формы и интенсивности формирующейся области загрязнения в рабочей зоне возле железнодорожной магистрали.

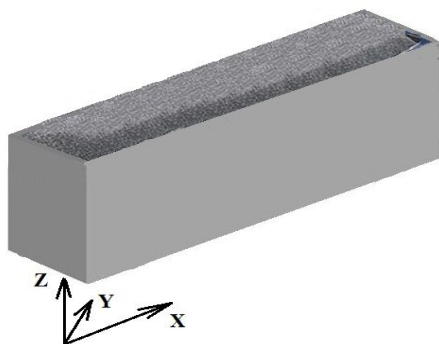


Рис. 3 – Схема расчетной области при 3D моделировании /

*Computational area, 3D simulation*

На рис.4, 5 показано концентрационное поле пылевого загрязнителя в двух сечениях:  $z=const$  (вид сверху) и  $x=const$  (вид сбоку). Схематически, положение рабочей зоны на рис.4 показано расположением работника железной дороги.

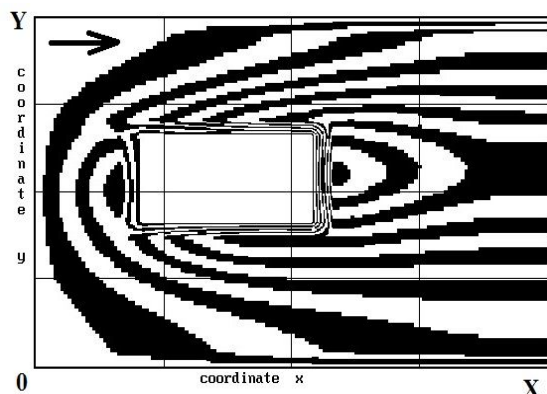


Рис. 4 – Зона загрязнения возле полувагона (вид сверху) /

*Contamination area near the wagon (top view)*

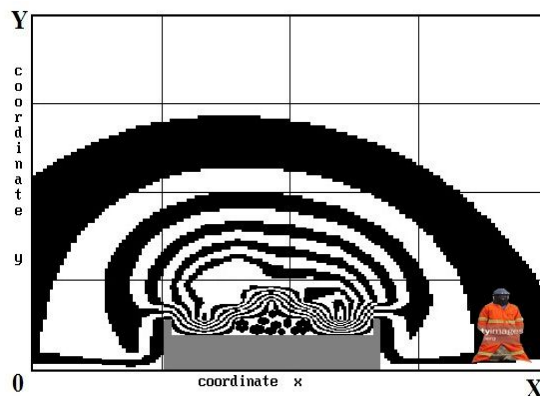


Рис. 5 – Зона загрязнения возле полувагона (вид сбоку, сечение  $x=const$ ) /

*Contamination area near the wagon (side view, section  $x=const$ )*

Из этих рисунков видно, что формируется обширная зона загрязнения возле полувагона. Очевидно, что работники железной дороги, находящиеся возле железнодорожной магистрали, попадают в зону влияния источника эмиссии угольной пыли (груза в полувагоне). Видно, что в зону влияния попадает значительная часть воздушного пространства возле полувагона.

#### Уменьшение интенсивности загрязнения воздушной среды в рабочих зонах возле железнодорожной магистрали при перевозке угля

Для уменьшения интенсивности пылевого загрязнения рабочих зон возле железнодорожной магистрали при транспортировке угля предлагается на полувагон устанавливать дополнительные борты, например, типа «крыло». Для подтверждения этой рабочей гипотезы был проведен лабораторный эксперимент на модели полувагона. Результаты эксперимента показаны ниже.

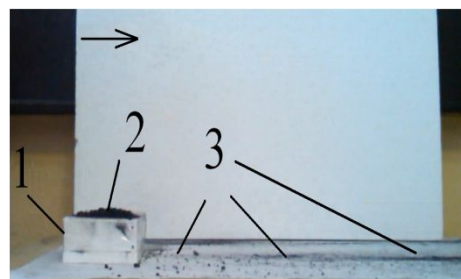


Рис. 6 – Зона загрязнения при отсутствии дополнительных бортов на модели полувагона: 1 – модель вагона; 2 – «шапка груза»; 3 – зона загрязнения /

*Contamination area near the wagon without additional boards to the wagon model: 1 – model of the wagon; 2 – "cap cargo"; 3 – contaminated area*

Как видно из рис.6 возле полувагона сформировалась обширная зона загрязнения, длина которой составляет более четырех «калибров».

Видно, что произошел вынос различных фракций угля. Более крупные фракции упали вблизи модели вагона.

Данный эксперимент подтверждает, что при использовании полувагонов без дополнительных бортов, формируется большая зона загрязнения в транспортном коридоре и за его пределами.

На рис.6 показана зона загрязнения возле модели полувагона с дополнительными бортами типа «крыло».

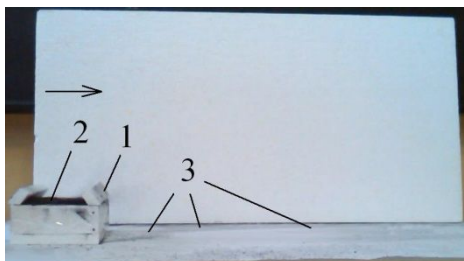


Рис. 7 – Зона загрязнения возле модели полувагона с дополнительными бортами типа «крыло»: 1 – модель полувагона; 2 – уголь; 3 – зона загрязнения / Contamination area near the wagon with additional boards like “wings”: 1 – wagon model; 2 – coal; 3 – contaminated area

Как видно из рис.7, формирующаяся зона загрязнения значительно меньше, как по площади, так и по интенсивности, чем для модели вагона, не имеющего дополнительные борта, что позволяет

рекомендовать применение таких дополнительных бортов на практике.

### Научная новизна и практическая значимость

Создана 3D модель, позволяющая прогнозировать интенсивность формирования зон загрязнения возле железнодорожных вагонов при перевозке сыпучих грузов. Данные модели дают возможность учесть наиболее существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере. Представленные 3D численные модели основаны на применении фундаментальных уравнений аэродинамики и массопереноса.

### Выводы

1. Рассмотрены эффективные 3D численные модели «diagnostic models» для расчета уровня загрязнения атмосферы пылевыми выбросами при перевозке железнодорожным транспортом сыпучих грузов. Предложенные модели позволяют рассчитать 3D аэродинамику ветрового потока и процесс массопереноса пыли на прилегающие к железной дороге территории.

2. Дальнейшее совершенствование моделей следует проводить в направлении их развития для расчета аэродинамики на базе уравнений Навье-Стокса.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беляев, Н. Н. Моделирование нестационарных процессов аварийного загрязнения атмосферы: монография / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, П. Б. Машихина. – Д. : «Акцент ПП», 2014. – 127 с.
2. Беляев, Н. Н. Математическое моделирование в задачах экологической безопасности и мониторинга чрезвычайных ситуаций: монография / Н. Н. Беляев, Е. Ю. Гунько, П. Б. Машихина. – Днепропетровск : «Акцент ПП», 2013. – 159 с.
3. Беляев, Н. Н. Защита окружающей среды при транспортировке угля / Н. Н. Беляев, А. А. Карпо // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2015 – № 48 – С. 223 – 228.
4. Беляев, Н. Н. Моделирование процесса сноса угольного концентрата из полувагонов / Н. Н. Беляев, А. А. Карпо // Науковий вісник буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архіт. – Харків, 2016. – №1 (83). – С. 196–199.
5. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеониздат, 1985. – 273 с.
6. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
7. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
8. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
9. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
10. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер – Москва : Мир, 1980. – 539 с.
11. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 87 – 91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
12. Biliaiev, M. The Numeric Forecast of Air Pollution Caused by a Blasting Accident in the Enterprise Responsible for Rocket Fuel Utilization in Ukraine / M. Biliaiev, M. Kharitonov // Disposal of Dangerous Chemicals in Urban Areas and Mega Cities. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop. – Springer, 2013. – P. 313–327.

## REFERENCES

1. Belyaev N.N., Berlov A.V., Mashikhina P.B. *Modelirovanie nestacionarnykh processov avarijnogo zagryazneniya atmosfery* [Simulation of non-stationary processes of emergency air pollution]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2014, 127 p.
2. Belyaev N.N., Gunko Ye.Yu., Mashikhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychnykh situatsiy* [Mathematical modeling in problems of environmental safety and monitoring emergencies]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013, 159 p.
3. Belyayev N.N., Karpo A.A. *Zashhita okruzhayushhej sredy pri transportirovke uglya* [Protecting the environment from coal transportation]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU* [Proc. of NMU]. Dnipropetrovsk, Natsionalnyi hirnychiy universytet Publ., 2015, № 48, pp. 223 – 228.
4. Belyayev N.N., Karpo A.A. *Modelirovanie processa snosa ugolnogo koncentrata iz poluvagonov* [Simulation of the process of coal concentrate out from halfwagons]. *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»* [Proc. «Scientific Bulletin of construction»], Kharkiv, 2016, issue 1 (83), pp. 196 – 199.
5. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
6. Bruyatskiy Ye.V. *Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov* [The theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Kiev, Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy Publ., 2000. 443 p.
7. Gusev N.G., Belyaev V.A. *Radioaktivnye vybrosy v biosfere* [Radioactive emissions in the biosphere]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1991. 257 p.
8. Marchuk G.I. *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the environmental problem]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 320 p.
9. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
10. Uork, K., Uorner S. *Zagryazneniye vozdukha. Istochniki i kontrol* [Air pollution. Sources and control]. Moscow, Mir Publ., 1980. 539 p.
11. Biliaiev, M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / M. Biliaiev // NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security. – 2012. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.
12. Biliaiev M. The Numeric Forecast of Air Pollution Caused by a Blasting Accident in the Enterprise Responsible for Rocket Fuel Utilization in Ukraine / M. Biliaiev, M. Kharitonov // Disposal of Dangerous Chemicals in Urban Areas and Mega Cities. Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop. – Springer, 2013. – P. 313–327.

*Стаття рекомендована до публікації д-ром техн. наук, проф. С.З. Поліщуком (Україна);*

Стаття надійшла в редакцію 06.04.2017