

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК [502.3:504.5:656.225.073.43-492]-047.58

Н. Н. БЕЛЯЕВ<sup>1\*</sup>, М. О. ОЛАДИПО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

### МОДЕЛИ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ СЫПУЧИХ ГРУЗОВ

**Цель.** Научная работа направлена на разработку 3D, 2D численных моделей для прогноза загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов в железнодорожном вагоне. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработаны численные модели, основанные на применении уравнений движения невязкой несжимаемой жидкости и массопереноса, для определения поля скорости ветрового потока вблизи вагонов и рассеивания пыли в атмосфере. Для численного интегрирования уравнения переноса загрязнителя использовалась неявная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется расщепление уравнения переноса, что позволяет построить эффективный алгоритм решения дифференциальной задачи. Неизвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета, что обеспечивает простую численную реализацию уравнений расщепления. Для численного интегрирования 3D уравнения для потенциала скорости применяется метод Рундсона. Для численного интегрирования 2D уравнения для потенциала скорости применяется метод суммарной аппроксимации. Разработанные численные модели составляют основу созданного пакета прикладных программ. На основе построенных численных моделей проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы при сносе угольной пыли из полувагона. **Результаты.** Разработаны 3D, 2D численные модели, которые относятся к классу «diagnostic models». Данные модели учитывают основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере при транспортировке сыпучих грузов. Предложенные численные модели требуют небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Эти модели используются для серийных расчетов разнообразных сценариях ситуаций, связанных с вопросами охраны окружающей среды и диагностики интенсивности загрязнения при различных метеоусловиях. Выполнены расчеты по определению концентрации загрязнителя и формирования зоны загрязнения вблизи вагона с сыпучим грузом в масштабе «microscale». **Научная новизна.** Созданы 3D, 2D численные модели, позволяющие учесть существенные факторы, влияющие на процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере, и формирование зоны загрязнения при перевозке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. **Практическая значимость.** Рассмотрены эффективные численные модели «diagnostic models» для экспресс-расчета уровня загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов железнодорожным транспортом. Модели могут быть применены для разработки мероприятий по охране окружающей среды при эксплуатации железнодорожного транспорта. Предложенные модели позволяют рассчитать 3D, 2D гидродинамику ветрового потока и процесс массопереноса вредных веществ в атмосфере.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы; железнодорожный транспорт; перевозка сыпучих грузов; численное моделирование

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

## Введение

Нигерия имеет хорошо развитую сеть железных дорог (рис. 1). Железнодорожный транспорт Нигерии перевозит большое количество сыпучих грузов как в порты, так и на предприятия страны. Транспортируется уголь, руда и т.п. Поскольку транспортировка сыпучих грузов происходит в полувагонах, то при такой транспортировке имеет место интенсивное загрязнение окружающей среды (рис. 2), вызванное сном пылевых загрязнений из полувагонов.



Рис. 1. Железнодорожная сеть в Нигерии

Fig. 1. The railway network in Nigeria

Этот процесс сопровождается такими последствиями:

1. Загрязнение подстилающей поверхности примагистральной территории, что ведет к ухудшению качества грунта.
2. Загрязнение атмосферы.
3. Потере массы груза в полувагонах.
4. Ухудшению свойств груза, его внешнего вида и товарного сорта.

В этой связи возникают две важные задачи:

1. Оценка уровня загрязнения окружающей среды при транспортировке сыпучих грузов.
2. Разработка методов защиты окружающей среды от загрязнения при транспортировке сыпучих грузов [4].

В настоящей работе для решения первой задачи разработаны специализированные численные модели. Следует отметить, что в настоящее время для решения задачи по оценке уровня загрязнения окружающей среды используются эмпирические или аналитические

модели [5–7, 10, 12, 13]. Данные модели не учитывают ряд физических факторов, которые существенно влияют на формирование концентрационного поля пыли в атмосфере. Эти методики не учитывают профиль скорости ветра, влияние самого вагона на формирование локального аэродинамического режима, форму насыпи сыпучего груза в полувагоне и т.д. Аналитические модели разработаны для случая точечного постоянно действующего источника выброса. Кроме этого, если применяется модель Гаусса [6, 7, 13], то необходимо выполнить научное обоснование значений коэффициентов дисперсии, которые были получены для территории США или Великобритании. Для территории других стран такого обоснования нет. Другим подходом к прогнозу уровня загрязнения окружающей среды при эмиссии вредных веществ является применение численных моделей [2, 3, 9, 14, 15]. Но существует определенный дефицит численных моделей для решения задач рассматриваемого класса.



Рис. 2. Сдвиг пылевых загрязнений при транспортировке сыпучих грузов

Fig. 2. Blowing dust contamination during transportation of bulk cargo

Поэтому возникает важная задача по созданию современных численных моделей класса CFD (computational fluid dynamics), которые позволяли бы осуществлять оценку уровня загрязнения окружающей среды при перевозке сыпучих грузов железнодорожным транспортом.

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

**Цель**

Целью данной работы является разработка 3D, 2D численных моделей для прогноза уровня загрязнения атмосферы при эмиссии пылевых загрязнений из полувагонов. Ставится задача создания моделей, которые позволяли бы учитывать основные физические факторы рассеивания пыли в атмосфере и при этом требовали бы малых затрат компьютерного времени при практической реализации (это модели группы «diagnostic models»).

**Методика**

Прогноз уровня загрязнения атмосферы при сдуве пылевых загрязнений из полувагона проводится в два этапа. На первом этапе решается задача по определению поля скорости воздушного потока с учетом взаимодействия его с полувагоном. Для решения этой задачи применяется уравнение для потенциала скорости (модель течения невязкой жидкости) [14, 15]:

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

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

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются по зависимостям:

$$u = \partial \varphi / \partial x, \quad v = \partial \varphi / \partial y, \quad w = \partial \varphi / \partial z.$$

Постановка краевых условий для данного уравнения рассматривается в работах [3, 8, 14].

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 [2, 3, 6, 14, 15]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_g)C}{\partial z} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \delta(z - z_i), \quad (2)$$

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 [3, 8].

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

$$u = u_1 (z/z_1)^p, \quad \mu_z = k_1 (z/z_1)^m, \quad \mu_x = \mu_y = k_0 u,$$

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 [2, 3]. С помощью маркеров задается положение железнодорожного вагона, форма «насыпи» сыпучего груза в полувагоне.

Для решения моделирующих уравнений (1), (2) используется метод сеток. Уравнение для потенциала скорости численно интегрируется с помощью метода Рундсона [11]. Для этого исходное уравнение для потенциала скорости предварительно приводится к эволюционному виду:

$$\partial P / \partial t = \partial^2 P / \partial x^2 + \partial^2 P / \partial y^2 + \partial^2 P / \partial z^2,$$

где  $t$  – фиктивное время.

Далее осуществляется аппроксимация производных и получается следующее разностное уравнение:

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

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

На основе данной зависимости осуществляется расчет значения потенциала скорости в ячейках, соответствующих области воздушного потока.

В результате применения такой аппроксимации получается разностное уравнение, которое легко решить по явной формуле.

Для численного интегрирования уравнения массопереноса (2) применяется неявная разностная схема расщепления [2, 14, 15]. 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.

Для экспресс решения задачи аэродинамики (профильная задача) предлагается использовать двухмерное уравнение для потенциала скорости [14, 15]:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0, \quad (3)$$

где  $\varphi$  – потенциал скорости, ось  $Y$  направлена вертикально вверх.

Компоненты вектора скорости воздушного потока в этом случае рассчитываются по зависимостям:

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

После определения двухмерного поля скорости осуществляется расчет формирования зоны пылевого загрязнения путем решения следующего уравнения массопереноса:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v-w)C}{\partial y} = \text{div}(\mu \text{grad} C) + \sum_{i=1}^N Q_i(t) \delta(x-x_i) \delta(y-y_i), \quad (4)$$

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель);  $w$  – скорость гравитационного оседания примеси (пыль);  $t$  – время.

Уравнение для потенциала скорости (3) численно интегрируется с помощью метода суммарной аппроксимации [11]. В результате применения этого метода осуществляется расщепление в разностном виде исходного уравнения на два уравнения. Определение неизвестного значения потенциала скорости из этих

двух уравнений происходит по явной схеме бегущего счета.

Для численного интегрирования уравнения массопереноса (4) применяется неявная разностная схема расщепления [14, 15].

На основе построенных численных моделей создан пакет прикладных программ («generic model»). Для проведения расчетов на базе этого пакета программ необходимо задать:

1. Класс устойчивости атмосферы.
2. Профиль скорости ветра.
3. Форму насыпи сыпучего груза в полувагоне.
4. Интенсивность выделения пыли от насыпи в полувагоне.

Отметим, что время расчета 3D аэродинамической задачи и задачи массопереноса составляет порядка 10 сек, а задачи в 2D постановке – 5 сек.

## Результаты

Разработанные численные модели относятся к классу «diagnostic models». Данные модели могут быть использованы для быстрого серийного расчета загрязнения воздушной среды для разнообразных сценариев транспортировки сыпучих грузов в полувагонах при различных метеоситуациях. Построенные модели позволяют оперативно получить картину зон загрязнения, которые формируются возле вагона при сдуве пылевых загрязнений.

Пример практического использования разработанной 2D численной модели показан ниже. Рассматривался процесс сдува пылевого загрязнения из полувагона, транспортирующего уголь (рис. 3). Целью расчета являлась оценка размеров, формы и интенсивности формирующейся зоны загрязнения при транспортировке груза.

Как видно из рис. 3, зону загрязнения, которая сформировалась при сдуве пыли из полувагона, можно условно разбить на две подзоны: подзона 1 – это область с большим градиентом концентрации пыли, которая формируется непосредственно над насыпью груза в вагоне; подзона 2 – это шлейф пыли за полувагоном. Хорошо видно из рис. 3, что шлейф пыли за полувагоном имеет значительные размеры и происходит загрязнение не только воздушной среды, но и подстилающей поверхности. Картина зоны загряз-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

нення кардинально змінюється, якщо на борту по-лувагона встановить екран (рис. 4).

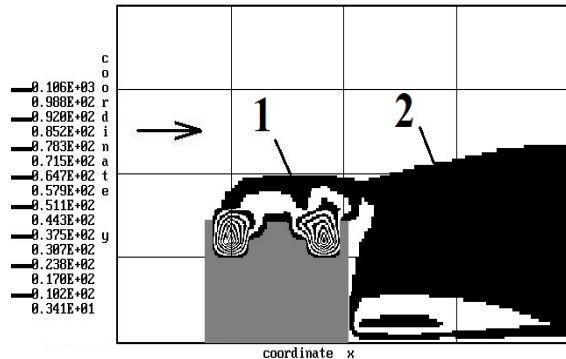


Рис. 3. Зона забруднення поруч з вагоном:

1 – зона забруднення, сформована над насипом в вагоні; 2 – зона забруднення за вагоном

Fig. 3. Pollution area near the car:

1 – pollution zone formed on the embankment in the car; 2 – pollution zone behind the car

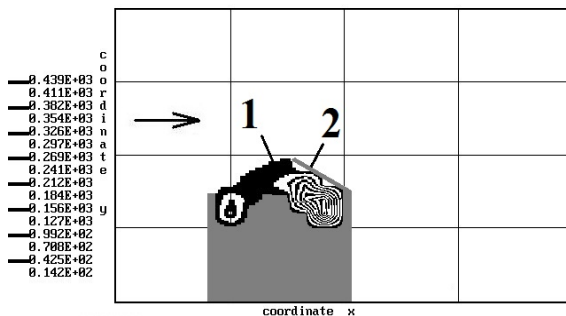


Рис. 4. Зона забруднення при використанні екрана, встановленого на борту вагона:

1 – зона забруднення, сформована над насипом в вагоні; 2 – екран

Fig. 4. Pollution zone when using the screen mounted on the car board:

1 – pollution zone formed on the embankment in the car; 2 – screen

Из рис.4 видно, что установка экрана привела к существенному уменьшению размеров зоны загрязнения атмосферного воздуха. Практически основная зона загрязнения формируется над насыпью груза. Экран препятствует интенсивному сносу пыли за вагоном.

Таким образом, применение разработанных численных моделей позволяет быстро осуществлять оценку экологической безопасности при транспортировке сыпучих грузов и определять эффективность применения экрана для минимизации уровня загрязнения атмосферного воздуха.

### Научная новизна и практическая значимость

Созданы 3D, 2D численные модели, позволяющие рассчитывать формирование зон пылевых загрязнений возле железнодорожных вагонов при перевозке сыпучих грузов с учетом возможности установки защитного экрана на вагоне. Данные модели дают возможность учесть наиболее существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере. Представленные 3D, 2D численные модели основаны на применении фундаментальных уравнений аэродинамики и массопереноса.

Особенностью разработанных моделей является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении расчетных данных и удобство анализа получаемых результатов прогноза.

### Выводы

Рассмотрены эффективные 3D, 2D численные модели «diagnostic models» для расчета уровня загрязнения атмосферы пылевыми выбросами при перевозке железнодорожным транспортом сыпучих грузов. Данные модели позволяют рассчитать 3D, 2D аэродинамику ветрового потока и процесс массопереноса пыли на прилегающие к железной дороге территории.

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

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Белов, И. А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами / И. А. Белов. – Ленинград : Машиностроение, 1983. – 144 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. Моделирование процесса сноса угольного концентрата из полувагонов / Н. Н. Беляев, А. А. Карпо // Наук. вісн. буд-ва : зб. наук. пр. / Харк. нац. ун-т буд-ва та архі-

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

- тектури. – Харків, 2016. – Вип. 1 (83). – С. 196–199.
4. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
  5. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
  6. Бруацкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруацкий. – Киев : Ин-т 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. Машихина, П. Б. Моделирование распространения примеси в атмосфере с учетом рельефа местности / П. Б. Машихина // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Дніпропетровськ, 2009. – Вип. 27. – С. 138–142.
  10. Рудаков, Д. В. Модель рассеивания примеси в приземном слое атмосферы над поверхностью со сложным рельефом / Д. В. Рудаков // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту. Серія: Механіка. – Дніпропетровськ, 2004. – № 6. – Вип. 8, т. 1. – С. 89–97.
  11. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
  12. Светличная, С. Д. Оценка полученной токсодозы при распространении первичного облака токсического вещества / С. Д. Светличная // Проблеми надзвичайних ситуацій : зб. наук. пр. / Нац. ун-т цив. захисту України. – Харків, 2011. – Вип. 13. – С. 127–132.
  13. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. – Москва : Мир, 1980. – 539 с.
  14. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Київ : Наук. думка, 1997. – 368 с.
  15. 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. – 2011. – P. 87–91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8\_15.

М. М. БІЛЯЄВ<sup>1\*</sup>, М. О. ОЛАДІПО<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

## МОДЕЛІ ОЦІНКИ РІВНЯ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРИ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ СИПУЧИХ ВАНТАЖІВ

**Мета.** Наукова робота спрямована на розробку 3D, 2D чисельних моделей для прогнозу забруднення атмосфери при транспортуванні сипучих вантажів у залізничному вагоні. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі розроблені чисельні моделі, засновані на застосуванні рівнянь руху нев'язкої нестисливої рідини і масопереносу, для визначення поля швидкості вітрового потоку поблизу вагонів та розсіювання пилу в атмосфері. Для чисельного інтегрування рівняння транспорту забруднювача використовувалася неявна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється розщеплення рівняння переносу, що дозволяє побудувати ефективний алгоритм розв'язання диференціальної задачі. Невідоме значення концентрації забруднювача на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу біжучого рахунку, що забезпечує просту чисельну реалізацію рівнянь розщеплення. Для чисельного інтегрування 3D рівняння для потенціалу швидкості застосовується метод Річардсона. Для чисельного інтегрування 2D рівняння для потенціалу швидкості застосовується метод сумарної апроксимації. Розроблені чисельні моделі складають основу створеного пакета прикладних програм. На основі побудованих чисельних моделей проведений обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення атмосфери при знесенні вугільного пилу з піввагона. **Результати.** Розроблено 3D, 2D чисельні моделі, які відносяться до класу «diagnostic models». Дані моделі враховують основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання пилових забруднень в атмосфері

## ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

при транспортуванні сипучих вантажів. Запропоновані чисельні моделі вимагають невеликих затрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої та середньої потужності. Ці моделі використовуються для серійних розрахунків різноманітних сценаріїв ситуацій, пов'язаних із питаннями охорони навколишнього середовища і діагностики інтенсивності забруднення при різних метеоумовах. Виконано розрахунки по визначенню концентрації забруднювача і формування зони забруднення поблизу вагона з сипучим вантажем у масштабі «microscale». **Наукова новизна.** Створені 3D, 2D чисельні моделі, що дозволяють врахувати істотні фактори, впливаючі на процес розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері, і формування зони забруднення при перевезенні сипучих вантажів залізничним транспортом. **Практична значимість.** Розглянуто ефективні чисельні моделі «diagnostic models» для експрес-розрахунку рівня забруднення атмосфери при транспортуванні сипучих вантажів залізничним транспортом. Моделі можуть бути застосовані при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації залізничного транспорту. Запропоновані моделі дозволяють розрахувати 3D, 2D гідродинаміку вітрового потоку і процес масопереносу шкідливих речовин в атмосфері.

*Ключові слова:* забруднення атмосфери; залізничний транспорт; перевезення сипучих вантажів; чисельне моделювання

М. М. BILIAIEV<sup>1\*</sup>, М. О. OLADIPO<sup>2\*</sup>

<sup>1\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail gidravlika2013@mail.ru, ORCID 0000-0002-1531-7882

<sup>2\*</sup>Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryan St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail Oladipo.toye@outlook.com, ORCID 0000-0001-7945-6657

## THE ASSESSMENT MODELS OF AIR POLLUTION DURING TRANSPORTATION OF BULK CARGO

**Purpose.** The scientific work is concentrated on development of 3D, 2D numerical models for the prediction of atmospheric pollution during transport of bulk cargo in the railway car. **Methodology.** To solve this problem numerical models were developed, based on the use of the motion equations of inviscid incompressible fluid and mass transfer, to determine the field of wind velocity near the cars and dispersion of dust in the atmosphere. For the numerical integration of the pollutant transport equation implicit alternating-triangular difference scheme was used. When constructing a difference scheme splitting of the transport equation is carried out that allows us to construct an efficient algorithm for solving a differential problem. Unknown value of the pollutant concentration at every step of splitting is determined by the explicit scheme – the method of point-to-point computation, which provides a simple numerical implementation of splitting equations. For numerical integration of the 3D equation for the velocity potential method of Richardson is applied. For numerical integration of the 2D equation for the velocity potential the method of total approximation is applied. The developed numerical models are the basis of established software package. On the basis of the constructed numerical models a computational experiment to assess the level of air pollution when demolition of coal dust from the gondola car was carried out. **Findings.** 3D, 2D numerical models that belong to the class «diagnostic models» were developed. These models take into account the main physical factors affecting the process of dust pollution dispersion in the atmosphere during transportation of bulk cargo, but require small costs of the computer time in the practice at the low and medium power machines. These models are used for serial calculations of various situations of scenarios related to issues of environmental protection and pollution intensity diagnostics for different weather conditions. Computational calculations to determine pollutant concentrations and formation of pollution zone near the cars with bulk cargo in «microscale» scale were submitted. **Originality.** 3D, 2D numerical models were created. They allow taking into account the relevant factors, influencing the process of pollutants dispersion in the atmosphere, and formation of the pollution zone during transport of bulk cargo by rail. **Practical value.** Efficient numerical models «diagnostic models» for rapid calculation of the atmosphere pollution level during transportation of bulk cargo by rail were considered. Models can be used in the development of environmental protection measures at the operation of rail transport. Proposed model allows calculating 3D, 2D hydrodynamics of wind flow and mass transfer process of pollutants in the atmosphere.

*Keywords:* air pollution; railway transport; bulk cargo transportation; numerical simulation

## REFERENCES

1. Belov I.A. *Vzaimodeystviye neravnomernykh potokov s pregradami* [Interaction of nonuniform flows with baffles]. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ., 1983. 144 p.
2. Biliaiev M.M., Gunko Ye.Yu., Mashikhina P.B. *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy* [Mathematical modeling in problems of environmental safety and monitoring of emergencies]. Dnepropetrovsk, Aktsent PP Publ., 2013. 159 p.
3. Biliaiev M.M., Karpo A.A. Modelirovaniye protsessa snosa ugolnogo kontsentrata iz poluvagonov [Simulation of process of coal concentrate demolition from gondola cars]. *Zbirnyk naukovykh prats «Naukovyi visnyk budivnytstva»* [Proc. «Scientific Bulletin of Construction»], 2016, no. 1 (83), pp. 196-199.
4. Berlyand M.Ye. *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prediction and regulation of air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1985. 273 p.
5. Berlyand M.Ye. *Sovremennyye problemy atmosfernoy diffuzii i zagryazneniya atmosfery* [Contemporary problems of atmospheric diffusion and air pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1975. 448 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. *Radioaktivnyye vybrosty 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. Mashikhina P.B. Modelirovaniye rasprostraneniya primesi v atmosfere s uchetom relefa mestnosti [The distribution modeling of impurities in the atmosphere with taking into account of terrain]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana* [Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan], 2009, issue 27, pp. 138-142.
10. Rudakov D.V. Model rasseivaniya primesi v prizemnom sloye atmosfery nad poverkhnostyu so slozhnym reliefom [Model of impurity dispersion in the atmospheric surface layer over a surface with complex relief]. *Visnyk Dnipropetrovskoho natsionalnoho universytetu. Seriya: Mekhanika* [Bulletin of Oles Honchar Dnipropetrovsk National University. Series: Mechanics], 2004, no. 6, issue 8, vol. 1, pp. 89-97.
11. Samarskiy A.A. *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Moscow, Nauka Publ., 1983. 616 p.
12. Svetlichnaya S.D. Otsenka poluchennoy toksodozy pri rasprostraneni pervichnogo oblaka toksicheskogo veshchestva [Evaluation of the toxic dose received at the distribution of the primary cloud of toxic substances]. *Zbirnyk naukovykh prats «Problemy nadzvychainykh sytuatsii»* [Proc. «Problems of emergency situations»], 2011, issue 13, pp. 127-132.
13. Uork, K., Uorner S. *Zagryazneniye vozdukha. Istochniki i kontrol* [Air pollution. Sources and control]. Moscow, Mir Publ., 1980. 539 p.
14. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Biliaiev M.M. *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution spreading in the environment]. Kyiv, Naukova dumka Publ., 1997. 368 p.
15. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. Air Pollution Modeling and its Application XXI. Netherlands, Springer Publ., 2012. pp. 87-91.

*Статья рекомендована к публикации д.физ.-мат.н., проф. С. А. Пичуговым (Украина); д.т.н., проф. С. З. Полищуком (Украина)*

Поступила в редколлегию: 01.06.2016

Принята к печати: 30.09.2016