

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

УДК [504.3:622.411.52]:656.2

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, М. О. ОЛАДИПО^{2*}

^{1*}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

^{2*}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

РАСЧЕТ ДИНАМИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИМАГИСТРАЛЬНОЙ ТЕРРИТОРИИ ПРИ ПЕРЕВОЗКЕ УГЛЯ

Цель. Научная работа предполагает разработку 3D численной модели для прогноза загрязнения атмосферы при транспортировке сыпучих грузов в железнодорожном вагоне. **Методика.** Для решения поставленной задачи разработана трехмерная численная модель, основанная на применении уравнения переноса пылевых загрязнений в атмосферном воздухе под действием ветра и атмосферной турбулентной диффузии. Для численного интегрирования моделирующего уравнения переноса пыли использовалась неявная разностная схема. При построении разностной схемы осуществляется предварительное расщепление исходного уравнения переноса на последовательность решения трех уравнений. Первое из них учитывает перенос пыли по траекториям, второе уравнение – перенос пыли под действием атмосферной турбулентной диффузии, а третье уравнение – изменение концентрации пыли в атмосферном воздухе за счет ее эмиссии из вагонов. Незвестное значение концентрации загрязнителя на каждом шаге расщепления определяется по явной схеме – методу бегущего счета, что обеспечивает простую численную реализацию уравнений расщепления. Разработанная численная модель составляет основу специализированной компьютерной программы. На основе построенной численной модели проведен вычислительный эксперимент по оценке уровня загрязнения атмосферы на железнодорожной станции при движении состава с углем. **Результаты.** Разработана 3D численная модель, которая относится к классу «screening models». Данная модель учитывает основные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере при транспортировке угля. Предложенная численная модель требует небольших затрат компьютерного времени при практической реализации на компьютерах малой и средней мощности. Эта модель может использоваться для оперативных расчетов динамики загрязнения атмосферного воздуха при перевозке угля железнодорожным транспортом. Выполнены расчеты по определению концентрации загрязнителя и формированию зоны загрязнения на станции Епуги. Представлены результаты физического эксперимента, позволяющие рекомендовать применение дополнительных бортов специальной формы для минимизации выноса угольной пыли из полувагонов. **Научная новизна.** Авторами создана 3D численная модель, позволяющая учесть существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пыли в атмосфере. Модель позволяет рассчитывать формирование зон загрязнения при перевозке угля железнодорожным транспортом. **Практическая значимость.** Рассмотрена эффективная численная модель класса «screening models» для экспресс-расчета уровня загрязнения атмосферы при транспортировке угля железнодорожным транспортом. Модель может быть применена при разработке мероприятий по охране окружающей среды при эксплуатации железнодорожного транспорта. Предложенная модель позволяет оперативно рассчитать 3D перенос пыли в атмосферном воздухе.

Ключевые слова: загрязнение атмосферы; железнодорожный транспорт; перевозка угля; численное моделирование

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Введение

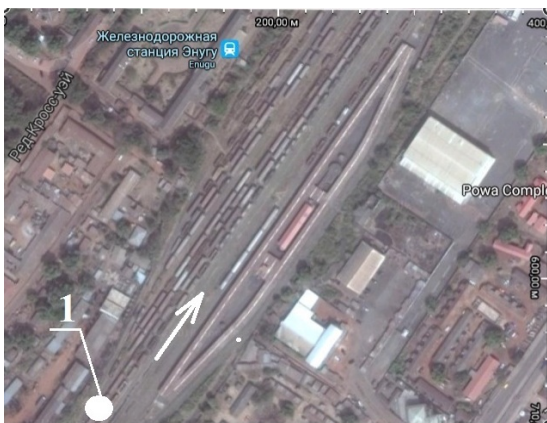
Транспортировка угля в Нигерии осуществляется железнодорожным транспортом (рис. 1), поскольку страна имеет достаточно хорошо развитую сеть железных дорог. Однако, транспортировка угля осуществляется в полувагонах, вследствие чего происходит вынос угольной пыли [6, 12, 14]. При таком выносе угольной пыли происходит интенсивное загрязнение транспортного коридора и прилегающей территории.



Рис. 1. Перевозка угля в Нигерии

Fig. 1. Transportation of coal in Nigeria

Особенно опасен такой процесс загрязнения, когда состав проходит через железнодорожные станции (рис. 2), вблизи селитебных зон или по территории промышленных объектов [13, 15]. В этой связи возникает важная задача по прогнозированию интенсивности загрязнения транспортного коридора и примагистральной территории при перевозке угля [13, 16, 17].

Рис. 2. Железнодорожная станция Enugu (Нигерия):
1 – место «входа» состава с углем в расчетную областьFig. 2. Railway station Enugu (Nigeria):
1 – «entry» point of the train with coal into the computational region

Анализ литературных источников, посвященных этой проблеме, показал, что для прогнозирования процесса загрязнения воздушной среды используется модель Гаусса [3, 5, 8], реализованная в виде кода «AERMOD» [10]. Данный пакет программ позволяет рассчитать загрязнение окружающей среды в приближении «постоянно действующий точечный источник». Модель Гаусса является эффективным инструментом оценки уровня загрязнения воздушной среды, но не учитывает профиль скорости ветра, движение источника эмиссии. Применение CFD моделей для решения этой задачи требует использования мощных компьютеров и значительных затрат времени на получение прогнозных данных. В этой связи, важно отметить, что актуальной задачей является разработка эффективных численных моделей, позволяющих учитывать основные физические факторы, влияющие на формирование зоны загрязнения в транспортном коридоре при движении состава с углем и разработка методов по минимизации выноса угольной пыли из полувагонов [4, 6, 16].

Цель

Целью данной работы является разработка 3D численной модели для прогноза уровня загрязнения атмосферы при эмиссии пылевых загрязнений из полувагонов. Ставится задача создания модели, которая позволяла бы учитывать основные физические факторы рассеивания пыли в атмосфере, движение источника эмиссии (состав с углем) и при этом требовала бы малых затрат компьютерного времени при практической реализации (эта модель группы «screening models»).

Математическая модель. Прогноз уровня загрязнения атмосферы при выносе пылевых загрязнений из полувагона осуществляется на базе фундаментального уравнения массопереноса [1, 2, 7, 9, 11]:

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

где C – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель); u, v, w – компоненты

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

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, 7, 9]. Отметим, что координаты источника эмиссии (полувагонов с углем) зависят от времени. Таким образом, с помощью задания зависимости $x_i=f(t), y_i=f(t)$ можно моделировать изменения положения вагонов в расчетной области с течением времени, то есть моделировать движение состава с углем.

В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и вертикального коэффициента атмосферной диффузии [3, 5]:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p, \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \mu_x = \mu_y = k_0 u, \quad (2)$$

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 решение. Для численного интегрирования уравнения (1) используются неявные разностные схемы [1, 2, 9, 11]. Предварительно данное уравнение расщепляется на дифференциальном уровне на последовательность следующих уравнений:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w-w_g)C}{\partial z} + \sigma C = 0,$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(x-x_i(t)) \delta(y-y_i(t)) \delta(z-z_i).$$

Первое уравнение данной системы описывает перенос пыли по траекториям. Второе уравнение описывает перенос пыли за счет атмосферной турбулентной диффузии. Третье уравнение учитывает изменение концентрации пыли в атмосферном воздухе под действием

источников эмиссии (вынос пыли из полувагонов). Численное интегрирование этих уравнений выполняется на прямоугольной разностной сетке. Для численного интегрирования первого уравнения этой системы используется попеременно-треугольная неявная разностная схема. Для численного интегрирования второго уравнения данной системы используется метод суммарной аппроксимации. Для численного интегрирования третьего уравнения используется метод Эйлера.

Применяемая неявная попеременно-треугольная разностная схема строится таким образом, чтобы на каждом шаге расщепления неизвестное значение концентрации пыли определялось по явной схеме бегущего счета [1, 2]. Это позволяет получить простые рекуррентные соотношения, которые удобны для программирования. Для программной реализации разработанной численной модели использовался FORTRAN. Создан специализированный код «Coal Dust Emission».

Для проведения расчетов на базе этого кода необходимо задать:

1. Класс устойчивости атмосферы.
2. Профиль скорости ветра.
3. Скорость движения состава, направление движения.
4. Интенсивность выделения пыли от насыпи в полувагоне.

Отметим, что время расчета 3D задачи и задачи массопереноса составляет порядка 6 сек. Таким образом, разработанный код позволяет быстро проводить серийные расчеты в течение одного рабочего дня.

Результаты

Пример практического использования разработанного кода «Coal Dust Emission» показан ниже. Рассматривался процесс движения состава с углем на железнодорожной станции Епуги (Нигерия). Ставилась задача по определению интенсивности загрязнения транспортного коридора при вхождении состава с углем на станцию. На рис. 2 (позиция 1) показана точка «входа» состава на станцию. Стрелкой, на данном рисунке, показано направление движения состава.

На последующих рисунках показана зона пылевого загрязнения (уровень $z = 1,7 \text{ м}$) для различных моментов времени.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

Рис. 3. Зона пылевого загрязнения на станции Enugu ($t = 15$ с)Fig. 3. Dust-polluted zone at the Enugu station ($t = 15$ sec.)Рис. 4. Зона пылевого загрязнения на станции Enugu ($t = 37$ с)Fig. 4. Dust-polluted zone at the Enugu station ($t = 37$ sec.)

Как видно из представленных рисунков, при движении состава формируется обширная зона пылевого загрязнения. Это значит, что под влияние источника эмиссии пыли попадают работники станции – монтеры пути, сцепщики, сигналисты и т.д. Также очевидно, что пылевое загрязнение может проникнуть внутрь вагонов, находящихся рядом составов. В этой связи возникает важная задача по минимизации выноса угольной пыли из полувагонов. Ниже рассматривается новый подход к решению этой задачи.

Рабочая гипотеза. Для минимизации выноса угольной пыли из полувагона предлагается осуществить геометрическое воздействие на воздушный поток, который обтекает полувагон с грузом угля. Для этого рекомендуется установить на полувагон дополнительные борта специальной формы, например, как показано на рис. 5 (борт типа «внутреннее крыло»). Для

обоснования, предложенной конструкции борта, проведем рассуждения с использованием методов системного анализа. Для этой цели рассмотрим эмпирическую зависимость для оценки интенсивности пылевыведения от поверхности угля в полувагоне. Эта зависимость имеет вид [6]:

$$Q = \rho V_B S t \left(0,10837 \frac{\rho \times V_B^2}{\rho_{OB}} + 0,1703 \frac{j_B}{g} - 0,3217 \omega - 0,3546 \right) 10^{-2}, \quad (3)$$

где Q – потери угля при транспортировке; ρ – плотность воздуха; V_B – скорость воздуха вблизи обтекаемой поверхности; S – площадь поверхности, из которой выдувается груз; t – продолжительность процесса выдувания груза; ρ_{OB} – объемная масса груза; d – средний диаметр частиц груза; g – ускорение свободного падения; j_B – ускорение вертикальных колебаний вагона; ω – влажность воздуха.

Зависимость (3) достаточно «полно» учитывает те факторы, которые определяют интенсивность эмиссии пыли от поверхности груза. Это дает нам определенный *ключ* к решению задачи – если необходимо изменить интенсивность пылевыведения, надо «воздействовать» на конкретный фактор, увеличить его или уменьшить в зависимости от того, с каким знаком «плюс» или «минус» входит в формулу (3) этот фактор. Например, если изменить влажность груза (параметр ω) и ее увеличить, то интенсивность пылевыведения – уменьшится, так как в формулу (3) данный параметр входит со знаком «минус». На практике такой подход реализуется путем подачи воды на поверхность груза перед его отправкой, то есть путем увлажнения угля. Аналогично рассуждая, мы приходим к выводу, что если уменьшить скорость воздушного потока V_B вблизи обтекаемой поверхности (локальная скорость), то можно уменьшить интенсивность пылевыведения. Поэтому, для минимизации интенсивности пылевыведения при перевозке угля, будем «воздействовать» на этот параметр. Воздействие будем проводить в направлении уменьшения параметра V_B . Например, такое воздейст-

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

вие можно осуществить геометрическим путем – то есть, как указывалось выше, применить дополнительный борт с «внутренним крылом» (рис. 5).

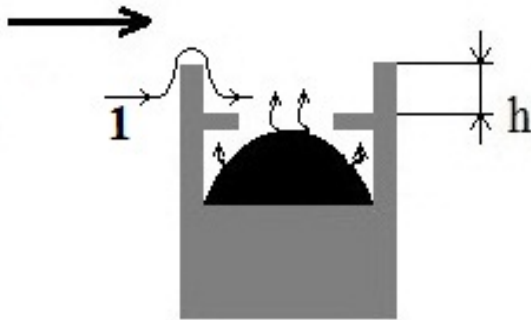


Рис. 5. Дополнительный борт типа «внутреннее крыло»:
1 – линия тока

Fig. 5. Additional board of «inner wing» type:
1 – stream line

При использовании такой конструкции происходит удлинение линий тока частиц воздуха, входящих внутрь полувагона, а значит – происходит локальное уменьшение скорости V_B воздушного потока. То есть при применении такого борта происходит *геометрическое* воздействие на воздушный поток.

Для подтверждения рабочей гипотезы был проведен физический эксперимент в лаборатории кафедры «Гидравлика и водоснабжение» Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна. Результаты физического эксперимента представлены ниже.

На рис. 6 представлены результаты эксперимента по оценке размеров зоны загрязнения, если используется полувагон без дополнительных бортов с «шапкой груза».

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 осели вблизи вагона.

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

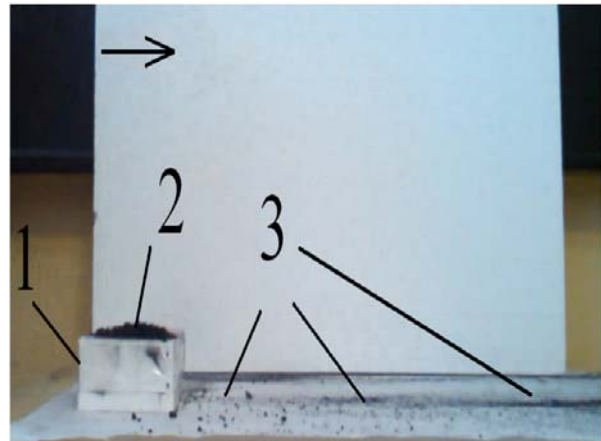


Рис. 6. Зона загрязнения при отсутствии дополнительных бортов на модели полувагона:

1 – модель вагона; 2 – «шапка груза»;
3 – зона загрязнения

Fig. 6. Pollution zone in the absence of additional boards at the model of gondola car:
1 – model of the car; 2 – «cargo cap»; 3 – pollution zone

На рис. 7 показана модель полувагона с дополнительными бортами типа «внутреннее крыло», а на рис. 8 представлены результаты эксперимента по оценке зоны загрязнения за таким полувагоном.



Рис. 7. Модель полувагона с дополнительными бортами типа «внутреннее крыло»:
1 – «внутреннее крыло»

Fig. 7. Gondola car model with additional boards, type «inner wing»:
1 – «inner wing»

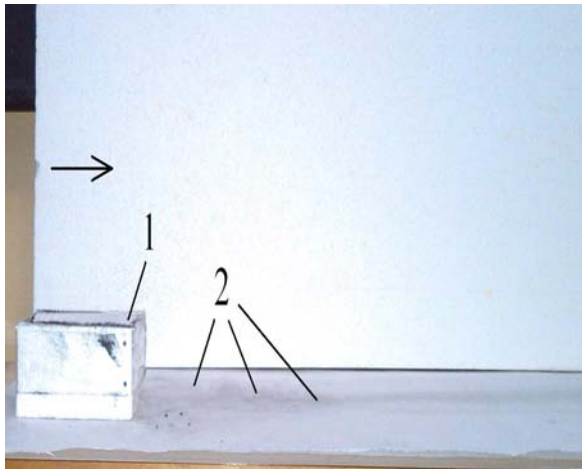


Рис. 8. Зона загрязнення при использовании дополнительных бортов типа «внутреннее крыло»:

1 – модель вагона; 2 – зона загрязнения

Fig. 8. Pollution zone at additional boards usage, type «inner wing»:

1 – the car model; 2 – pollution zone

Как видно из рис. 8, формирующаяся зона загрязнения значительно меньше как по площади, так и по интенсивности. Также видно, что в отличие от предыдущего варианта (то есть вагон без дополнительных бортов), здесь произошел вынос, в основном, мелких фракций угля.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов подтверждают выдвинутую рабочую гипотезу о возможной минимизации выноса угольной пыли из полувагона за счет использования дополнительных бортов типа «внутреннее крыло».

Научная новизна и практическая значимость

Создана 3D численная модель, позволяющая рассчитывать динамику загрязнения воздушной среды при движении железнодорожного состава с углем. Предложенная модель дает возможность при моделировании учесть наиболее существенные физические факторы, влияющие на процесс рассеивания пылевых загрязнений в атмосфере.

Особенностью предложенной численной модели является использование стандартной исходной информации, быстрота в получении расчетных данных и удобство анализа получаемых результатов прогноза.

Для минимизации процесса выноса угольной пыли из полувагона предложено использовать дополнительные борты типа «внутреннее крыло».

Представлены результаты физического эксперимента, подтверждающие эффективность такого подхода.

Выводы

Рассмотрена эффективная 3D численная модель, которая относится к классу «screening models» для расчета динамики загрязнения атмосферы при перевозке угля железнодорожным транспортом. Модель позволяет рассчитать процесс загрязнения атмосферного воздуха с учетом метеоситуации, скорости движения состава, интенсивности пылевыведения.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. 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.
2. Беляев, Н. Н. Моделирование аварийного загрязнения атмосферы при чрезвычайной ситуации в хранилище твердого ракетного топлива / Н. Н. Беляев, А. В. Берлов, А. В. Шевченко // Наука та прогрес транспорту. – 2014. – № 5 (53). – С. 29–38. doi: 10.15802/stp2014/29973.
3. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.
4. Берлянд, М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
5. Бруязкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Е. В. Бруязкий. – Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

6. Воробйов, Є. О. Запобігання забруднення повітря пилом під час транспортування вугілля / Є. О. Воробйов, М. О. Ніколенко, І. О. Худякова // Вісті АДІ ДВНЗ «ДонНТУ». – Горлівка, 2005. – № 1. – С. 34–38.
7. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.
8. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль / К. Уорк, С. Уорнер. – Москва : Мир, 1980. – 539 с.
9. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – Киев : Наук. думка, 1997. – 368 с.
10. AERMOD: Description of model formulation [Электронный ресурс]. – USA, North Carolina, 2004. – 91 p. – Режим доступа: https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf. – Загл. с экрана. – Проверено : 23.01.2017.
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. Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study / B. Fabiano, F. Curro, A. P. Reverberi, E. Palazzi // Process Safety and Environmental Protection. – 2014. – Vol. 92. – Iss. 2. – P. 150–159. doi: 10.1016/j.psep.2013.01.002.
13. Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes : IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. – Lyon, 2012. – Vol. 105. – 714 p.
14. Emmitt, G. D. Fugitive coal dust: An old problem demanding new solutions / G. D. Emmitt // Port Technology International. – 1999. – No. 9. – P. 125–128.
15. Full cost accounting for the life cycle of coal / P. R. Epstein, J. J. Buonocore, K. Eckerle [et al.] // Annals of the New York Academy of Sciences. – 2011. – Vol. 1219. – Iss. 1. – P. 73–98. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x.
16. Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain / Chief Scientist & Engineer. – Sydney NSW, Australia, 2015. – 75 p.
17. Szabo, M. F. Environmental assessment of coal transportation / M. F. Szabo. – Cincinnati, Ohio : Environmental Protection Agency, 1978. – 142 p.

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, М. О. ОЛАДИПО^{2*}

^{1*}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

^{2*}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

РОЗРАХУНОК ДИНАМІКИ ЗАБРУДНЕННЯ ПРИМАГІСТРАЛЬНОЇ ТЕРИТОРІЇ ПІД ЧАС ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВУГІЛЛЯ

Мета. Наукова робота передбачає розробку 3D чисельної моделі для прогнозу забруднення атмосфери при транспортуванні сипучих вантажів у залізничному вагоні. **Методика.** Для вирішення поставленої задачі розроблена тривимірна чисельна модель, заснована на застосуванні рівняння переносу пилових забруднень в атмосферному повітрі під дією вітру та атмосферної турбулентної дифузії. Для чисельного інтегрування моделюючого рівняння транспорту пилу використовувалася неявна різницева схема. При побудові різницевої схеми здійснюється попереднє розщеплення вихідного рівняння переносу на послідовність розв'язання трьох рівнянь. Перше з них враховує перенесення пилу по траєкторіях, друге рівняння – перенесення пилу під дією атмосферної турбулентної дифузії, а третє рівняння – зміна концентрації пилу в атмосферному повітрі за рахунок її емісії з вагонів. Невідоме значення концентрації забруднювача на кожному кроці розщеплення визначається за явною схемою – методу біжучого рахунку, що забезпечує просту чисельну реалізацію рівнянь розщеплення. Розроблена чисельна модель становить основу спеціалізованої комп'ютерної програми. На основі побудованої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент по оцінці рівня забруднення атмосфери на залізничній станції під час руху потяга з вугіллям. **Результати.** Розроблено 3D чисельну модель, яка відноситься до класу «screening models». Дана модель враховує основні

ЕКОЛОГІЯ НА ТРАНСПОРТІ

фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання пилових забруднень в атмосфері при транспортуванні вугілля. Запропонована чисельна модель вимагає невеликих витрат комп'ютерного часу при практичній реалізації на комп'ютерах малої та середньої потужності. Ця модель може використовуватися для оперативних розрахунків динаміки забруднення атмосферного повітря при перевезенні вугілля залізничним транспортом. Виконано розрахунки по визначенню концентрації забруднювача та формуванню зони забруднення на станції Enugu. Представлені результати фізичного експерименту, що дозволяють рекомендувати застосування додаткових бортів спеціальної форми для мінімізації виносу вугільного пилу з напіввагонів. **Наукова новизна.** Авторами створена 3D чисельна модель, що дозволяє врахувати істотні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання пилу в атмосфері. Модель дозволяє розраховувати формування зон забруднення при перевезенні вугілля залізничним транспортом. **Практична значимість.** Розглянута ефективна чисельна модель класу «screening models» для експрес-розрахунку рівня забруднення атмосфери при транспортуванні вугілля залізничним транспортом. Модель може бути застосована при розробці заходів із охорони навколишнього середовища при експлуатації залізничного транспорту. Запропонована модель дозволяє оперативно розрахувати 3D перенесення пилу в атмосферному повітрі.

Ключові слова: забруднення атмосфери; залізничний транспорт; перевезення вугілля; чисельне моделювання

M. M. BILIAIEV^{1*}, M. O. OLADIPO^{2*}

^{1*}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

^{2*}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

CALCULATION OF POLLUTION DYNAMICS NEAR RAILWAY TERRITORY DURING COAL TRANSPORTATION

Purpose. The article is aimed to develop 3D numerical model for the prediction of atmospheric pollution during transportation of bulk cargo in the railway car. **Methodology.** To solve this problem, it was developed three-dimensional numerical model, based on the use of the transport equation of dust pollution in the air by the wind and atmospheric turbulent diffusion. For the numerical integration of the simulating equation of the dust transport the implicit difference scheme was used. When constructing a difference scheme, it was carried out prior splitting of the original transport equation into the sequence of solutions of three equations. The first of them takes into account the transport of dust in paths, the second equation – dust transport under the influence of atmospheric turbulent diffusion, and the third equation – change of the dust concentration in the air due to its emissions from the cars. Unknown value of the pollutant concentration at every step of splitting is determined by the explicit scheme – the method of running account, which provides a simple numerical implementation of splitting equations. The developed numerical model is the basis for specialized computer program. On the basis of the constructed numerical model we carried out a computational experiment to assess the level of air pollution at the railway station during the motion of train with coal. **Findings.** Authors developed 3D numerical model, which belongs to the class of «screening models». This model takes into account the main physical factors affecting the process of dispersion of dust pollution in the atmosphere during coal transportation. The proposed numerical model requires low cost of computer time in the practical implementation on small and medium-power computers. This model can be used for rapid calculations of the dynamics of air pollution when transporting coal by rail. Calculations to determine the pollutant concentration and formation of the contamination zone at Enugu station were performed. The results of physical experiment, allow us to recommend the use of additional specially shaped boards to minimize the removal of coal dust from gondola cars. **Originality.** It was created 3D numerical model that makes it possible to take into account significant physical factors that influence the process of dust dispersion in the atmosphere. The model allows calculating the formation of pollution zones during transportation of coal by rail. **Practical value.** The effective numerical model of the class «screening models» for rapid calculation of the level of air pollution from coal transport by rail was considered. The model can be applied in the development of environmental protection measures in the operation of rail transport. The proposed model allows you to quickly calculate the 3D transfer of dust in the air.

Keywords: air pollution; railway transport; coal transportation; numerical simulation

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Gunko, Y. Y., & Mashikhina, P. B. (2013). *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy*. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Biliaiev, M. M., Berlov, O. V., & Shevchenko, A. V. (2014). Simulation of the accidental pollution after the emergency in to the storage of rocket solid propellant. *Science and Transport Progress*, 5(53), 29-38. doi: 10.15802/stp2014/29973
3. Berlyand, M. Y. (1985). *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
4. Berlyand, M. Y. (1975). *Sovremennyye problemy atmosferno diffuzii i zagryazneniya atmosfery*. Leningrad: Gidrometeoizdat.
5. Bruyatskiy, Y. V. (2000). *Teoriya atmosferno diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. Kyiv: Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy.
6. Vorobyov, Y. O., Nikolenko, M. O., & Khudyakova, I. O. (2005). Zapobihannia zabrudnennia povitria pylom pid chas transportuvannia vuhillia. *Visti ADI DVNZ «DonNTU»*, 1, 34-38.
7. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy*. Moscow: Nauka.
8. Wark, K., & Warner, C. F. (1980). *Zagryazneniye vozdukha. Istochniki i kontrol*. Moscow: Mir.
9. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Biliaiev, M. M. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede*. Kyiv: Naukova dumka.
10. U.S. Environmental Protection Agency. (2004). *AERMOD: Description of model formulation*, No. EPA-454/R-03-004. USA, North Carolina. Retrieved from https://www3.epa.gov/scram001/7thconf/aermod/aermod_mfd.pdf
11. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security, series C: Environmental Security*, 87-91. doi: 10.1007/978-94-007-1359-8_15
12. Fabiano, B., Curro, F., Reverberi, A. P., & Palazzi, E. (2014). Coal dust emissions: From environmental control to risk minimization by underground transport. An applicative case-study. *Process Safety and Environmental Protection*, 92(2), 150-159. doi: 10.1016/j.psep.2013.01.002
13. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. (2012). *Diesel and Gasoline Engine Exhausts and Some Nitroarenes*, 105. Lyon: International Agency for Research on Cancer.
14. Emmitt, G. D. (1999). Fugitive coal dust: An old problem demanding new solutions. *Port Technology International*, 9, 125-128.
15. Epstein, P. R., Buonocore, J. J., Eckerle, K., Hendryx, M., Stout III, B. M., Heinberg, R., ... & Glustrom, L. (2011). Full cost accounting for the life cycle of coal. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1219(1), 73-98. doi: 10.1111/j.1749-6632.2010.05890.x
16. NSW Chief Scientist & Engineer. (2015). *Initial Report on the Independent Review of Rail Coal Dust Emissions Management Practices in the NSW Coal Chain*. Sydney: NSW. Retrieved from http://www.chiefscientist.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0009/79884/Initial-Report_Review-rail-coal-dust-emissions.pdf
17. Szabo, M. F. (1978). *Environmental assessment of coal transportation*. Cincinnati, Ohio: Environmental Protection Agency.

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

Поступила в редколлегию: 30.09.2016

Принята к печати: 12.01.2017