

УДК [504.3:622.411.52]:656.2

Н. Н. БЕЛЯЕВ – д.т.н., профессор, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, gidravlika2013@mail.ru  
ОЛАДИПО Мутиу Олатойе – аспирант, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (Federal Republic of Nigeria, Lagos), gidravlika2013@mail.ru

## МИНИМИЗАЦИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЫНОСА ПЫЛИ ИЗ ПОЛУВАГОНА ПРИ ТРАНСПОРТИРОВКЕ УГЛЯ

### Постановка проблемы

Железнодорожный транспорт является основным средством транспортировки угля в Нигерии. При такой перевозке происходит унос угольной пыли из вагонов, что приводит к загрязнению путей, прилегающей территории и рабочих зон на территории шахт или предприятий, где используется уголь (рис. 1).



Рис. 1. Сдув пыли при транспортировке угля

В этой связи возникает важная задача по разработке способов снижения интенсивности выноса угольной пыли из вагонов. На основе анализа литературных источников были выявлены такие способы минимизации процесса выноса пыли [2, 5, 12]:

1. Покрытие груза специальными растворами [2].
2. Разравнивание поверхности груза в вагоне.
3. Уплотнение груза в вагоне перед отправкой.
4. Заделка щелей, зазоров чтобы предотвратить высыпание груза при транспортировке.
5. Подача воды на поверхность груза.
6. Полное закрытие (контейнеризация) груза.

7. Установка специальных крышек на вагоне.
8. Транспортировка груза в специальных тоннелях (крайне редко, но возможно широко будет применяться в будущем).

Несмотря на такое разнообразие методов актуальной задачей является разработка альтернативных методов, обладающих определенной эффективностью и не требующих больших экономических затрат при практической реализации. Важной задачей является создание методов расчета, позволяющих оценить эффективность предлагаемых способов минимизации выноса пыли из вагонов. Применяемые в настоящее время методики расчета уровня загрязнения окружающей среды при транспортировке угля, основаны на применении эмпирических и аналитических моделей [3, 4, 6, 9] не могут быть применены для решения указанной задачи, т.к. не позволяют учесть деформацию поля скорости воздушного потока вблизи вагона с грузом.

### Цель

Целью данной работы является разработка способа минимизации выноса угольной пыли из полувагона за счет установки дополнительных бортов определенной формы и создание 2D численной модели для научного обоснования этого способа. Ставится задача создания модели, которая позволяла бы рассчитывать процесс выноса пыли из полувагона с учетом установки на нем дополнительных бортов, имеющих «Г»-образную форму.

## Методика

Для исследования интенсивности уноса угольной пыли из полувагона без дополнительных бортов и с дополнительными бортами будет использоваться разработанная CFD модель. Основу разработанной CFD модели составляют численные модели, описывающие процессы аэродинамики и массопереноса. Моделирующие уравнения рассматриваются ниже.

**Модель аэродинамики.** Для определения поля скорости воздушного потока, обтекающего полувагон будет использоваться модель потенциального течения [1, 10, 11]. Моделирующим уравнением, в этом случае, является уравнение для потенциала скорости:

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

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

Компоненты вектора скорости воздушного потока рассчитываются по зависимостям:

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

Постановка краевых условий для данного уравнения рассматривается в работах [1, 10].

**Модель массопереноса.** После определения поля скорости воздушного потока возле полувагона, на втором этапе, решается задача о переносе пылевых загрязнений из полувагона в атмосферу. Для этого используется фундаментальное уравнение массопереноса [1, 4, 7, 10, 11]:

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

где  $C$  – концентрация загрязняющего вещества (пылевой загрязнитель);  $u, v$  – компоненты вектора скорости воздушного по-

тока;  $\mu = (\mu_x, \mu_y)$  – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;  $Q$  – интенсивность выброса загрязнителя от «насыпи» в полувагоне или от штабеля угля;  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  – дельта-функция Дирака;  $x_i, y_i$  – координаты источника выброса;  $w_g$  – скорость гравитационного оседания пыли;  $t$  – время.

Постановка краевых условий для данного уравнения рассмотрена в работах [1, 10]. В разработанной численной модели используются следующие зависимости для задания профиля ветра и коэффициентов атмосферной диффузии [3, 4]:

$$u = u_1 \left( \frac{y}{y_1} \right)^p, \quad \mu_y = k_1 \left( \frac{y}{y_1} \right)^m, \quad \mu_x = k_0 u, \quad (4)$$

где  $u_1$  – скорость ветра на высоте  $y_1$  (принимается  $y_1 \approx 10$  м);  $k_1 = 0,2$ ;  $k_0 = 0,1$ ;  $p = 0,16$ ;  $m \approx 1$ .

С помощью маркеров задается, положение железнодорожного вагона, его форма, форма «насыпи» сыпучего груза в полувагоне. Интенсивность выделения пыли от насыпи в полувагоне рассчитывается на базе эмпирических зависимостей.

## CFD модель

Для решения моделирующих уравнений (1), (3) используются конечно-разностные методы.

Для численного интегрирования уравнения массопереноса (3) применяется неявная разностная схема расщепления [1, 10]. Рассмотрим основные формулы аппроксимации и построения данной разностной схемы.

Производную за временем заменим разделенной разностью «назад»:

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

Конвективные производные представим так:

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

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

где  $u^+ = \frac{u+|u|}{2}$ ;  $u^- = \frac{u-|u|}{2}$ ;  $v^+ = \frac{v+|v|}{2}$ ;  
 $v^- = \frac{v-|v|}{2}$ .

Аппроксимируем конвективные производные разделенными разностями «против потока» на верхнем временном слое следующим образом:

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

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

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

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

При построении дискретной модели компоненты скорости  $u$  будем определять на вертикальных гранях разностных ячеек, а компоненты скорости  $v$  – на горизонтальных гранях.

Вторые производные аппроксимируем следующими выражениями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \tilde{\mu}_x \frac{C_{i+1,j}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} -$$

$$-\tilde{\mu}_x \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \tilde{\mu}_y \frac{C_{i,j+1}^{n+1} - C_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} -$$

$$-\tilde{\mu}_y \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}.$$

Здесь  $L_x^+$ ,  $L_x^-$ ,  $L_y^+$ ,  $L_y^-$ ,  $M_{xx}^+$ ,  $M_{xx}^-$ ,  $M_{yy}^+$ ,  $M_{yy}^-$  – условные обозначения разностных операторов. С учетом приведенных выше

обозначений запишем разностный аналог уравнения массопереноса:

$$\frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} +$$

$$+ L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + \sigma C_{ij}^{n+1} =$$

$$= \left( M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + \right.$$

$$\left. + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} \right) + Q_{ij} \delta_{ij}. \quad (5)$$

Здесь символ  $\delta_{ij}$  обозначает число "1" или «0», в зависимости от того, находится или нет в разностной ячейке « $ij$ » источник выброса пыли. Величина  $Q_{ij}$  рассчитывается так:

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

где  $Q_k$  – интенсивности выброса  $k$ -го точечного источника эмиссии пыли, который находится в разностной ячейке " $ij$ ".

Выполним расщепление разностного уравнения (5) на четыре разностные уравнения так, чтобы на каждом шаге учитывалось лишь одно направление переноса примеси, обусловленное знаком при конвективных производных. Для аппроксимации вторых производных будем использовать два временных слоя с целью получения на верхнем временном слое треугольного шаблона. Такой подход даст возможность осуществить решение каждого разностного уравнения по методу бегущего счета. В этом случае разностные уравнения имеют вид:

на первом шаге расщепления  $k = 1/4$ :

$$\frac{C_{ij}^{n+k} - C_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} \left( L_x^+ C^k + L_y^+ C^k \right) + \frac{\sigma}{4} C_{ij}^k =$$

$$= \frac{1}{4} \left( M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^n + M_{yy}^- C^n \right) +$$

$$+ \sum_{l=1}^N \frac{Q_l}{4} \delta_l;$$

на втором шаге расщепления  $k = n + \frac{1}{2}$ ;

$c = n + \frac{1}{4}$ :

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

на третьем шаге расщепления  $k = n + \frac{3}{4}$ ;

$$c = n + \frac{1}{2};$$

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

на четвертом шаге расщепления

$$k = n + 1; c = n + \frac{3}{4};$$

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

В дискретном виде дельта-функция Дирака  $\delta(x - x_i) \delta(y - y_i)$  «размазывается» на одну разностную ячейку так, чтобы сохранить суммарное количество  $q_i$  загрязняющего вещества, которое выбрасывается из всей площади разностной ячейки. Функция  $\delta_l$  тождественно равняется нулю во всех ячейках, кроме тех, где расположен источник выброса пыли.

Неизвестное значение концентрации пыли  $C$  на каждом шаге расщепления определяется по явной формуле «бегущего счета». Начальное условие для каждого уравнения расщепления записывается так:

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

Для реализации в дискретной модели граничного условия на твердых стенках

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

используются фиктивные ячейки.

Уравнение для потенциала скорости численно интегрируется с помощью метода условной аппроксимации [8]. В этом случае разностные уравнения, на каждом шаге расщепления записываются так:

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

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

На каждом шаге расщепления неизвестное значение потенциала скорости определяется по явной формуле бегущего счета.

После определения поля потенциала скорости рассчитываются компоненты вектора скорости воздушной среды по зависимостям:

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

Следует отметить, что компоненты вектора скорости воздушной среды рассчитываются на гранях разностных ячеек (контрольных объемов), что позволяет построить консервативную разностную схему для уравнения переноса пыли.

На базе рассмотренных разностных схем построена CFD модель «Coal Dust Dispersion».

## Результаты исследований

Разработанные численные модели относятся к классу «diagnostic models». Эти модели могут быть использованы для быстрого серийного расчета загрязнения воздушной среды для разнообразных сценариев транспортировки угля в полувагонах. Построенные модели позволяют оперативно получить картину формирующихся зон загрязнения при сдуве пыли и тем самым оценивать интенсивность загрязнения окружающей среды при транспортировке угля.

На базе разработанных численных моделей аэродинамики и массопереноса были проведены расчеты по оценке эффективности применения дополнительных бортов «Г»-образной формы, установленных на полувагоне, для минимизации количества сдуваемой с поверхности груза пыли. «Отправным» расчетным сценарием является полувагон, где «шапка» груза превышает высоту бортов полувагона (рис.2) [12].



Рис. 2. «Шапка» груза превышает высоту борта полувагона [12]

Расчетная схема для данного сценария показана рис. 3 (высота превышения «шапки» груза составляет  $h = 0,2$  м, расчетная схема №1). На рис. 4, 5 показаны расчетные схемы для другого варианта задачи, соответствующего установке дополнительных бортов «Г»-образной формы на полувагон. Условно такой навесной борт можно разбить на две части: вертикальная часть борта и наклонное «крыло», высотой  $H$ .

Исследование проводится для двух сценариев. Первый сценарий – высота вертикальной части навесного борта равна высоте «шапки» груза, а высота верхней части «крыла» превышает «шапку» груза на ве-

личину  $H = 0,2$  м (рис. 4). Этот сценарий назовем «низкое крыло», расчетная схема №2. Второй сценарий – вертикальная часть навесного борта выше «шапки» груза на величину  $h = 0,4$  м, параметр  $H = 0,4$  м (рис. 5). Данный сценарий назовем «высокое крыло», расчетная схема №3. Можно говорить, что рассматриваемые сценарии установки бортов, соответствуют частичной контейнеризации груза.

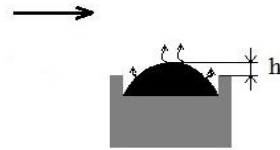


Рис. 3. Расчетная схема №1 (нет дополнительных бортов на полувагоне)

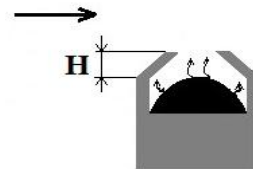


Рис. 4. Расчетная схема № 2 ( дополнительные борта на полувагоне «Г»-образной формы, вариант 1)

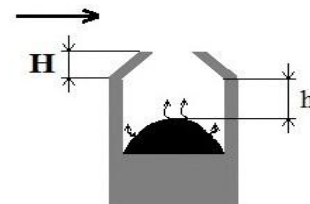


Рис. 5. Расчетная схема № 3 ( дополнительные борта на полувагоне «Г»-образной формы, вариант 2)

Ставится задача – оценить величину уноса угольной пыли из полувагона для каждого варианта задачи. При проведении расчетов полагалось, что интенсивность уноса пыли от любого участка поверхности груза составляет, в безразмерном виде,  $Q_k = a \cdot 100 \cdot V_m \cdot S$  [12]. Здесь  $V_m$  – местная скорость воздушного потока возле соответствующего участка груза;  $S$  – площадь участка поверхности груза;  $a$  – масштабный множитель (в модели предусмотрен вариант учета  $a = f(V_m)$ ).

Местная скорость  $V_m$ , определяется расчетным путем при решении аэродинамической задачи (первый этап проведения вычислительного эксперимента). Важно подчеркнуть, что такой подход к оценке величины интенсивности уноса пыли от конкретного участка груза позволяет *учитывать различную величину массы пыли, выделяемой от различных участков насыпи в вагоне, т.к. местная скорость воздушного потока везде – разная.* Следует отметить, что реализация такого подхода – очень сложная задача, решение которой может быть найдено только с помощью *CFD* моделирования.

На последующих рисунках показана зона загрязнения атмосферного воздуха возле полувагона с углем для рассматриваемых сценариев, т.е. без дополнительных бортов на полувагоне и с дополнительными бортами «Г»-образной формы, установленными на полувагоне.

Из представленных рисунков видно, что установка дополнительных бортов приводит к изменению интенсивности и формы зоны загрязнения.

Для количественной оценки влияния установки дополнительных бортов на интенсивность выноса пыли, при проведении вычислительного эксперимента, рассчитывалась масса пыли, уносимая из полувагона для каждого варианта задачи. Полученные данные представлены в безразмерном виде. Так, для расчетной схемы №1 (нет дополнительных бортов) величина выносимой из полувагона массы пыли составила  $M_{dust} = 15,53$ . Для расчетной схемы №2 (дополнительный борт типа «низкое крыло») – значение уносимой массы пыли составило  $M_{dust} = 6,74$ . Для расчетной схемы №3 (дополнительный борт типа «высокое крыло») значение уносимой массы пыли составило  $M_{dust} = 0,96$ . Значит, для расчетной схемы № 2 вынос пыли из полувагона уменьшился примерно в 2,3 раза, а для рас-

четной схемы №3 вынос пыли уменьшился примерно в 16 раз.

На втором этапе исследований рассчитывалась концентрация пыли в рабочей зоне возле полувагона. Безразмерное значение этой величины (для уровня 2 м) для каждого варианта задачи представлено в табл. 1–3.

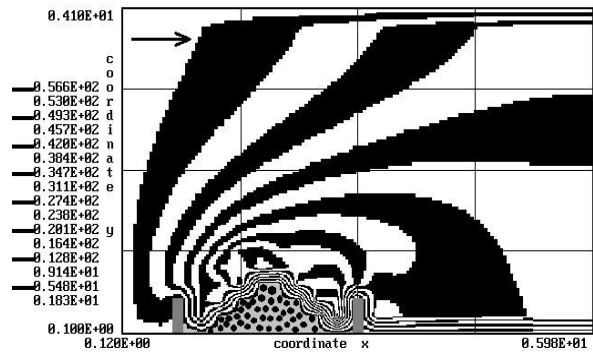


Рис. 6. Зона загрязнения возле полувагона при отсутствии дополнительных бортов

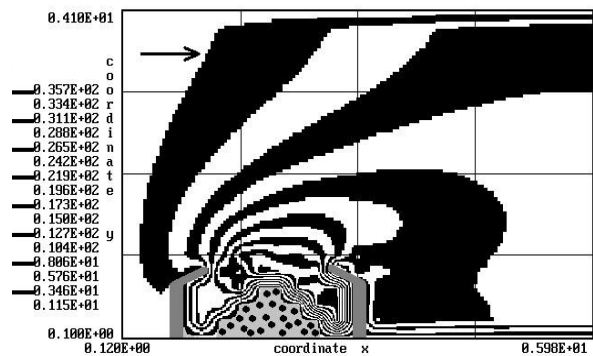


Рис. 7. Зона загрязнения возле полувагона при наличии дополнительных бортов «Г»-образной формы («низкое крыло»)

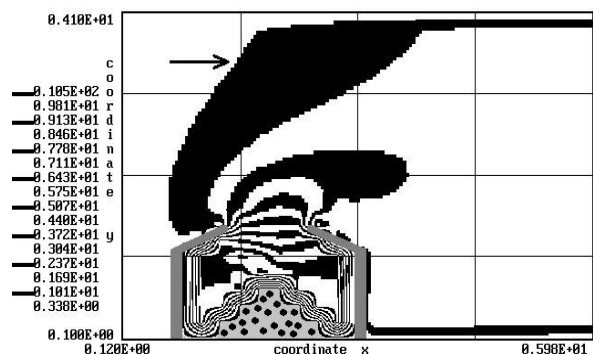


Рис. 8. Зона загрязнения возле полувагона при наличии дополнительных бортов «Г»-образной формы («высокое крыло»)

Таблица 1

**Безразмерное значение концентрации  
угольной пыли в рабочей зоне  
(нет навесных бортов)**

х, м	0,25	1,00	2,00
С	29,05	25,21	23,02

Таблица 2

**Безразмерное значение концентрации  
угольной пыли в рабочей зоне  
(навесной борт типа  
«низкое крыло»)**

х, м	0,25	1,00	2,00
С	12,43	10,71	9,67

Таблица 3

**Безразмерное значение концентрации  
угольной пыли в рабочей зоне  
(навесной борт типа  
«высокое крыло»)**

х, м	0,25	1,00	2,00
С	1,52	1,32	1,14

Анализируя данные, представленные в таблицах, можно утверждать, что применение навесных бортов предложенной формы позволяет значительно снизить загрязненность воздушной среды в рабочей зоне. То есть, за счет установки дополнительных бортов «Г»-образной формы на полувагон можно обеспечить снижение выноса пыли и тем самым минимизировать процесс загрязнения окружающей среды (в первую очередь воздушной среды в рабочих зонах на промышленных площадках и т.п.) при транспортировке угля.

### Выводы

Выполнена оценка интенсивности выноса угольной пыли из полувагона при установке на него дополнительных бортов «Г»-образной формы. Для решения данной задачи были разработаны 2D CFD модели. Данные модели позволяют рассчитать 2D аэродинамику ветрового потока и процесс массопереноса пыли на прилегающие к железной дороге территории.

Дальнейшее совершенствование модели следует проводить в направлении ее развития для расчета аэродинамики на базе 3D уравнений.

### Библиографический список

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 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 архіт. – Харків, 2016. – № 1 (83). – С. 196–199.
3. Берлянд, М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы [Текст] / М. Е. Берлянд. – Ленинград : Гидрометеоиздат, 1985. – 273 с.
4. Бруцкий, Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов [Текст] / Е. В. Бруцкий. – К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.
5. 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.
6. Гусев, Н. Г. Радиоактивные выбросы в биосфере / Н. Г. Гусев, В. А. Беляев. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 257 с.
7. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды [Текст] / Г. И. Марчук. – Москва: Наука, 1982. – 320 с.
8. Самарский, А. А. Теория разностных схем [Текст] / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
9. Уорк, К. Загрязнение воздуха. Источники и контроль [Текст] / К. Уорк, С. Уорнер – М.: Мир, 1980. – 539 с.

10. 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.
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. – 2011. – P. 87–91.
12. Final Report Environment Evaluation of Fugitive Coal Dust Emission From Coal Trains Goonyella, Blackwater and Moura Coal Rail Systems Queensland Rail Limited, 31 March, 2008. – Queensland, Australia. – 414 p.

**Ключові слова:** транспортування вугілля, винос вугільного пилу, чисельне моделювання, засоби зменшення виносу вугільного пилу.

**Ключевые слова:** транспортировка угля, вынос угольной пыли, численное моделирование, способы уменьшения выноса угольной пыли.

**Keywords:** transportation of coal, coal dust removal, numerical modeling, methods for reducing the removal of coal dust.

**Рецензенты:**

д.т.н., проф. С. З. Полищук,  
д.ф.-м.н., проф. С. О. Пичугов.

Поступила в редколлегию 01.09.2016.  
Принята в печать 10.09.2016.