

ОЦЕНКА УРОВНЯ ПЫЛЕВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ РАБОЧИХ ЗОН МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

¹Беликов А.С., ²Беляев Н.Н., ³Беляева В.В., ¹Берлов А.В.

¹ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»,
²Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени ака-

демика В. Лазаряна, ³Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара

ОЦІНКА РІВНЯ ПИЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ РОБОЧИХ ЗОН МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

¹Бєліков А.С., ²Біляєв М.М., ³Біляєва В.В., ¹Берлов О.В.

¹ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», ²Дніпровський
національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,
³Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара

ASSESSMENT OF THE DUST POLLUTION LEVEL IN THE WORKSPACES BY THE METHODS OF MATHEMATICAL MODELING

¹Belikov A.S., ²Biliaiev N.N., ³Biliaieva V.V., ¹Berlov O.V.

¹State Higher Education Establishment «Pridneprovsk State Academy of Civil Engineering and
Architecture», ²Academician V. Lazaryan Dniprovsk National University of Railway Transport,
³Dniprovsk National University after Oles Gonchar

Аннотация. Вынос угольной пыли от штабелей угля приводит к интенсивному загрязнению рабочих зон. Поэтому, определение уровня загрязнения воздушной среды возле штабелей угля для различных метеоситуаций, при появлении новых штабелей угля представляет собой важную прикладную задачу. Для практики необходимо иметь быстросчитающие математические модели, которые учитывают наиболее существенные физические процессы, которые влияют на формирование зон загрязнения возле штабелей угля. Сейчас, для прогнозирования уровня загрязнения воздушной среды при выносе пыли от штабелей угля применяется нормативная методика ОНД-86 или модель Гаусса. Данные методы прогнозирования дают возможность быстро рассчитать зоны загрязнения, но не учитывают геометрическую форму штабеля угля, неравномерность поля скорости возле него. Предмет настоящего исследования – создание математической модели для прогнозирования уровня загрязнения воздушной среды возле штабелей угля с учетом аэродинамики воздушных потоков возле них. Целью работы является разработка комплекса численных моделей, позволяющих оперативно рассчитывать уровень загрязнения воздушной среды при выносе угольной пыли от штабелей угля с учетом неравномерного выделения пыли от различных участков поверхности штабеля. Моделирующими уравнениями является трехмерное уравнение массопереноса (модель Марчука) и трехмерное уравнение для потенциала скорости. Модель Марчука позволяет учесть скорость оседания частиц угольной пыли, параметры турбулентной диффузии, неравномерную скорость воздушного потока возле штабеля угля. Для моделирования выноса угольной пыли от различных участков угольного штабеля используется дельта-функции Дирака. Для численного решения уравнения массопереноса применяется разностная схема расщепления. На базе трехмерного уравнения для потенциала скорости определяется неравномерное поле скорости возле штабеля угля. Для численного решения трехмерного уравнения для потенциала скорости применяется метод Рундсона. Рассматривается алгоритм решения задачи по расчету уровня загрязнения рабочих зон возле штабеля угля. Приводится описание структуры созданного комплекса компьютерных программ.

Ключевые слова: рабочая зона, пылевое загрязнение, штабель угля, компьютерное моделирование.

Введение. Вынос угольной пыли от штабелей приводит к формированию интенсивных областей загрязнения. Это является причиной загрязнения рабочих зон на промышленных площадках. Интенсивность, размеры зон пылевого загрязнения зависят от многих факторов: скорости и направления ветра, стабильности атмосферы, наличия рядом со штабелем других объектов (например, иного штабеля), влажности угля и т.д.

Для практики важно уметь прогнозировать зоны пылевого загрязнения, чтобы адекватно применять различные средства их минимизирования. Для оценки возможных зон пылевого загрязнения важно иметь научно – обоснованные математические модели.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время, при оценке уровня загрязнения воздушной среды возле штабелей угля принимается, что штабель – точечный источник эмиссии пылевого загрязнения. При таком допущении, мы имеем, что штабель – это «точка». Если такое допущение принято, то для оценки уровня загрязнения воздушной среды можно использовать нормативную методику – модель ОНД-86 (модель Берлянда, Гениховича) [2, 3] или модель Гаусса [3, 6]. Обе модели имеют, в настоящее время, программную реализацию в виде коммерческих пакетов программ, например, пакет AERMOD (реализация модели Гаусса) [10]. Но данные модели не позволяют учитывать геометрическую форму штабеля угля, а значит – не позволяют корректно рассчитать уровень загрязнения воздушной среды возле штабеля угля.

Формулировка цели работы. Цель исследования – создание комплекса численных моделей, позволяющих оперативно рассчитывать уровень загрязнения воздушной среды при выносе угольной пыли от штабелей угля с учетом неравномерного выделения пыли от различных участков поверхности штабеля.

Изложение основного материала. Для экспертной оценки уровня пылевого загрязнения при выносе пыли от штабеля угля будем использовать метод математического моделирования. Предлагаемая математическая модель включает два уравнения. Первое уравнение является фундаментальным уравнением аэродинамики – уравнение для потенциала скорости [1, 7]

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

где P – потенциал скорости.

Компоненты вектора скорости ветрового потока рассчитываются следующим образом:

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

Постановка граничных условий для уравнения (1) рассмотрена в [1, 7].

Для моделирования рассеивания угольной пыли возле штабеля используется трехмерное уравнение массопереноса (модель Марчука) [1, 4, 7, 8]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial (w - w_s)C}{\partial z} + \sigma C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (3)$$

где C – концентрация угольной пыли; x_i, y_i, z_i – координаты участка пылевыделения на поверхности штабеля; $\delta(x - x(t)_i)\delta(y - y(t)_i)\delta(z - z_i)$ – дельта-функция Дирака; μ_x, μ_y, μ_z – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; $Q_i(t)$ – интенсивность выноса угольной пыли; w_s – скорость гравитационного оседания частиц угольной пыли; t – время; u, v, w – компоненты вектора скорости воздушной среды.

Постановка краевых условий для уравнения (3) рассмотрена в [1, 7].

Следует подчеркнуть, что интенсивность выделения угольной пыли от различных участков штабеля – различна. Большую роль на эту величину оказывает значение локальной скорости воздушного потока возле конкретного участка поверхности штабеля угля. Для учета этого, будем рассчитывать выделение угольной пыли от различных участков на базе эмпирической зависимости [9]

$$Q = 4.2(V - V_{th}), \quad (4)$$

где Q – локальная интенсивность выделения угольной пыли от участка поверхности штабеля, где локальная скорость равна V ; V_{th} – пороговая скорость ($V_{th} = 1.58 \text{ м/с}$). Отметим, что значение локальной скорости воздушного потока возле различных участков определяется путем численного решения уравнения (1) и зависимостей (2).

Для численного решения моделирующих уравнений (1), (3) используются конечно – разностные методы. Так для численного интегрирования уравнения (1), используется идея установления решения по фиктивному времени. Для этого уравнение (1) записывается в виде

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial z^2} \quad (5)$$

где t – фиктивное время.

Далее, для решения уравнения (5) применяется следующая расчетная зависимость [6]:

$$\begin{aligned} P_{ijk}^{n+1} = P_{ijk}^n + \Delta t \frac{P_{i+1,j,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i-1,j,k}^n}{\Delta x^2} + \\ + \Delta t \frac{P_{i,j+1,k}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j-1,k}^n}{\Delta y^2} + \\ + \Delta t \frac{P_{i,j,k+1}^n - 2P_{ijk}^n + P_{i,j,k-1}^n}{\Delta z^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для начала расчета по зависимости (6) мы задаем начальное значение потенциала P в расчетной области.

Расчет по зависимости (6) заканчивается при выполнении условия:

$$\left| P_{i,j,k}^{n+1} - P_{i,j,k}^n \right| \leq \varepsilon \quad (7)$$

где ε – малое число; n – номер итерации.

Для численного интегрирования уравнения (3) осуществляется его физическое расщепление

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \quad (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)). \quad (10)$$

Уравнение (8) описывает перенос угольной пыли в координатных направлениях x , y , а уравнение (9) – перенос пыли в вертикальном направлении z . Для удобства, в уравнении (9) принято обозначение: $w = w - w_s$. Значение скорости гравитационного оседания угольной пыли зависит от ряда факторов и определяется, в основном, экспериментальным путем. При использовании рассматриваемой математической модели – этот параметр относится к входным данным и расчет зон загрязнения выполняется последовательно для каждой фракции.

Для численного интегрирования уравнения (10) применяется метод Эйлера [5];, а для численного интегрирования уравнений переноса (8), (9) – попеременно – треугольная разностная схема [1, 7]. Выполнена программная реализация разработанной численной модели и создана компьютерная программа «COAL-3V». Язык программирования – FORTRAN.

В структуру компьютерной программы входят:

СА1 – подпрограмма расчета поля скорости на базе трехмерной модели потенциального течения;

СА3 – подпрограмма расчета рассеивания угольной пыли в атмосфере;

СА4 – подпрограмма расчета поля потенциала скорости;

СА6 – подпрограмма печати результатов расчета.

Алгоритм решения. Расчет уровня пылевого загрязнения рабочих зон возле штабеля угля осуществляется так:

1) *первый* этап – ввод исходных данных в модель: формирование вида расчетной области, задание скорости набегающего потока ветра, задание формы штабеля и т.д.;

2) *второй* этап: расчет поля потенциала скорости в изучаемой области (решение аэродинамической задачи);

3) *третий* этап: расчет скорости воздушного потока (параметры u , v , w) в изучаемой области (решение аэродинамической задачи);

4) *четвертый* этап: расчет интенсивности выделения угольной пыли от

различных участков поверхности угольного штабеля на базе расчетных данных, полученных путем решения аэродинамической задачи;

5) *пятый* этап: расчет концентрации угольной пыли в исследуемой области и печать результатов моделирования.

С помощью разработанной численной модели была решена модельная задача. Рассматривалось два сценария. Первый сценарий – вынос угольной пыли от двух штабелей угля, имеющих сложную геометрическую форму (рис. 1). Второй сценарий – между штабелями расположен экран (рис. 2). Ниже, на рисунке показано распределение концентрации угольной пыли возле штабелей угля.

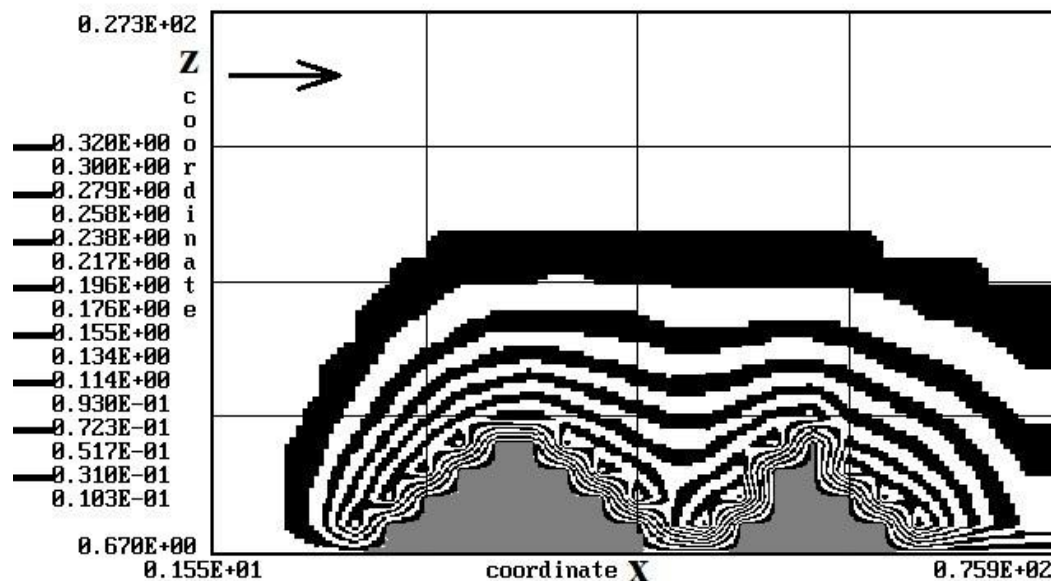


Рисунок 1 - Распределение концентрации угольной пыли возле штабелей (сценарий № 1, сечение $y=12$ м)

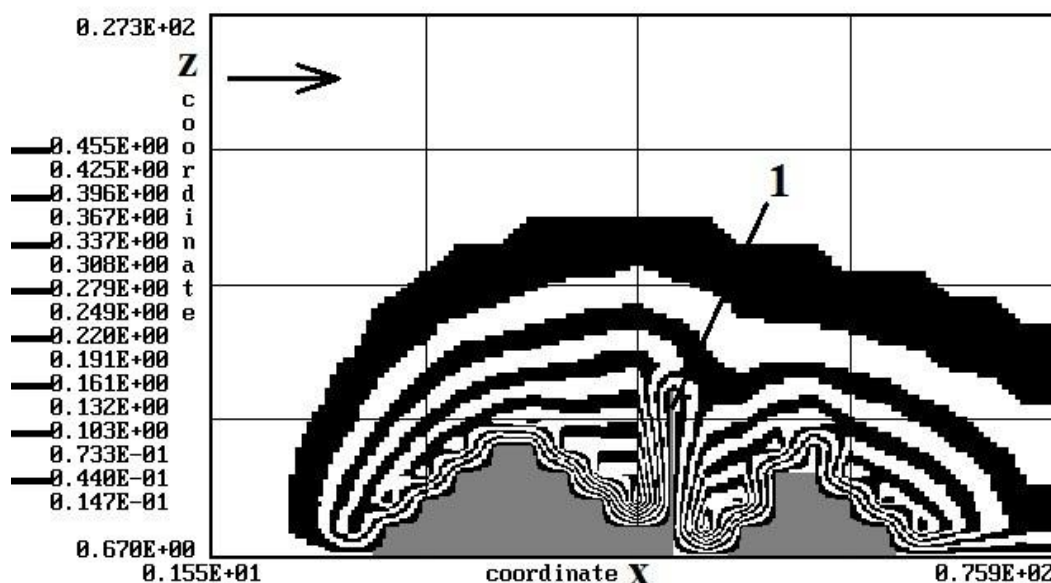


Рисунок 2 - Распределение концентрации угольной пыли возле штабелей (сценарий № 2, сечение $y=12$ м): 1 – вертикальный экран

Как видно из представленных рисунков, возле штабелей угля формируется сложная зона загрязнения, повторяющая форму источников пылевыведения – штабелей угла. На формирование этой зоны влияет не только метеоситуация, но и взаимное расположение штабелей угля. На рис. 3 показано распределение безразмерной концентрации угольной пыли за вторым штабелем (сечение $y=12$ м).

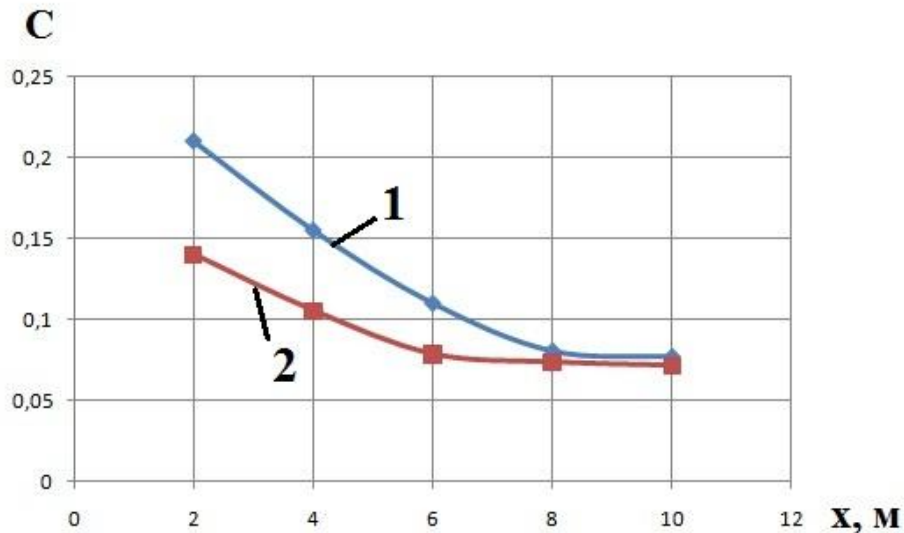


Рисунок 3 - Распределение безразмерной концентрации угольной пыли за вторым штабелем (высота $z=1.7$ м): 1 – для сценария №1; 2 – для сценария №2.

Из рис. 3 видно, что при использовании экрана происходит снижение концентрации угольной пыли в рабочей зоне за вторым штабелем.

Выводы. Рассмотрена численная модель для оценки уровня загрязнения воздушной среды при пылении угольных штабелей. Прогноз зоны загрязнения основывается на решении трехмерного уравнения массопереноса и трехмерного уравнения для потенциала скорости. Разработана компьютерная программа, осуществляющая практическое применение численной модели. Результатом работы компьютерной программы является распределение концентрации угольной пыли в рабочих зонах. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении создания 3D модели оценки уровня загрязнения воздушной среды на базе уравнений Навье – Стокса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Н.Н., Оладипо М.О., Кириченко П.С. Защита окружающей среды при транспортировке угля.- Кривой Рог: Изд.: Р.А. Козлов, 2018. 92с.
2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. 273 с.
3. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов. Киев: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. 443 с.
4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды. Москва: Наука, 1982. 320 с.
5. Самарский А. А. Теория разностных схем. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Уорк К. , Уорнер С. Загрязнение воздуха. Источники и контроль. Москва : Мир, 1980. 539 с.
7. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.К., Беляев Н.Н. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. Киев: Наук. думка, 1997, 368 с.

8. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography / Air Pollution Modeling and its Application XXI, Springer, 2012, pp. 87–91.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A., Oladipo M.O. Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train. / East European Scientific Journal. 2019. Vol 3(43). Pp. 10-15.
10. Tripathy D.P., Dash T.R., Badu A., Kanungo R. Assessment and Modeling of Dust Concentration in Opencast Coal Mine in India. / Global NEST Journal. 2015. Vol 17, No 4. pp 825-834.
<https://doi.org/10.30955/gnj.001617>

REFERENCES

1. Belyaev N.N., Oladipo M.O. and Kirichenko P.S. (2018), *Zashchita okruzhayushchey sredy pri transportirovke uglya* [Environmental protection in coal transportation], Krivoy Rog, Ukraine.
2. Berlyand M.Ye. (1985), *Prognoz i regulirovaniye zagryazneniya atmosfery* [Prognosis and controlling of atmosphere pollution]. Gidrometeoizdat Publ., Leningrad, USSR.
3. Bruyatskiy Y. V. (2000), *Teoriya atmosfernoy diffuzii radioaktivnykh vybrosov*. [The theory of atmospheric diffusion of radioactive emissions]. Institut gidromekhaniki NAN Ukrainy, Kyiv, Ukraine.
4. Marchuk, G. I. (1982), *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy* [Mathematical modeling in the problem of the environment]. Nauka, Moscow, USSR.
5. Samarskiy A.A. (1983), *Teoriya raznostnykh skhem* [The theory of difference schemes]. Nauka Publ., Moscow, USSR.
6. Wark K. and Warner C. F. (1980), *Zagryazneniye vozdukh. Istochniki i kontrol*. [Air pollution. Sources and control]. Mir, Moscow, USSR.
7. Zgurovskiy M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K. and Belyayev N.N. (1997), *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede* [Numerical modelling of pollution in the environment], Naukova Dumka, Kyiv, Ukraine.
8. Biliaiev M. (2012), "Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography", *Air Pollution Modeling and its Application XXI, Springer*, pp. 87–91.
https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Biliaiev M.M., Kozachyna V.A. and Oladipo M.O. (2019), "Numerical analysis of atmosphere pollution from coal train", *East European Scientific Journal*, Vol 3(43), pp. 10-15.
10. Tripathy D.P., Dash T.R., Badu A. and Kanungo R. (2015), "Assessment and Modeling of Dust Concentration in Opencast Coal Mine in India", *Global NEST Journal*, Vol 17, No 4, pp 825-834.
<https://doi.org/10.30955/gnj.001617>

Об авторах

Беликов Анатолий Серафимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Безопасность жизнедеятельности, ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Днепр, Украина, belikov@pgasa.dp.ua.

Беляев Николай Николаевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедры Гидравлика и водоснабжение, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, Днепр, Украина, water.supply.treatment@gmail.com

Беляева Виктория Витальевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Аэрогидромеханика и энергомассоперенос, Днепровский национальный университет имени Олеся Гончара, Днепр, Украина, vika_lulu@mail.ru.

Берлов Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры Безопасность жизнедеятельности, ГБУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры», Днепр, Украина, berlov@pgasa.dp.ua.

About the authors

Belikov Anatoliy Serafymovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Head of the Department Workplace Safety and Health, State Higher Education Institution «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Dnipro, Ukraine, belikov@pgasa.dp.ua.

Biliaiev Mykola Mykolaiovych, Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor, Head of the Department Hydraulics and water supply, Academician V. Lazaryan Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, Dnipro, Ukraine, water.supply.treatment@gmail.com

Biliaieva Viktoriia Vitaliivna, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor of the Department Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer, Dniprovsk National University after Oles Gonchar, Dnipro, Ukraine, vika_lulu@mail.ru.

Berlov Oleksandr Viktorovych, Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Associate Professor of the Department Workplace Safety and Health, State Higher Education Institution «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», Dnipro, Ukraine, berlov@pgasa.dp.ua.

Анотація. Винос вугільного пилу від штабелів вугілля призводить до інтенсивного забруднення робочих зон. Тому, визначення рівня забруднення повітряного середовища біля штабелів вугілля для різних метеоситуацій, при появі нових штабелів вугілля являє собою важливу прикладну задачу. Для практики необхідно мати швидкозрахункові математичні моделі, які враховують найбільш суттєві фізичні процеси, які впливають на формування зон забруднення біля штабелів вугілля. Зараз, для прогнозування рівня забруднення повітряного

середовища при винесенні пилу від штабелів вугілля застосовується нормативна методика ОНД-86 або модель Гаусса. Дані методи прогнозування дають можливість швидко розрахувати зони забруднення, але не враховують геометричну форму штабеля вугілля, нерівномірність поля швидкості біля нього. Предмет цього дослідження - створення математичної моделі для прогнозування рівня забруднення повітряного середовища біля штабелів вугілля з урахуванням аеродинаміки повітряних потоків біля них. Метою роботи є розробка комплексу чисельних моделей, що дозволяють оперативно розраховувати рівень забруднення повітряного середовища при винесенні вугільного пилу від штабелів вугілля з урахуванням нерівномірного виділення пилу від різних ділянок поверхні штабеля. Моделюючими рівняннями є тривимірне рівняння масопереносу (модель Марчука) і тривимірне рівняння для потенціалу швидкості. Модель Марчука дозволяє врахувати швидкість осідання частинок вугільного пилу, параметри турбулентної дифузії, нерівномірну швидкість повітряного потоку біля штабеля вугілля. Для моделювання виносу вугільного пилу від різних ділянок вугільного штабеля використовується дельта-функції Дірака. Для чисельного розв'язання рівняння масопереносу застосовується різницева схема розщеплення. На базі тривимірного рівняння для потенціалу швидкості визначається нерівномірне поле швидкості біля штабеля вугілля. Для чисельного розв'язання тривимірного рівняння для потенціалу швидкості застосовується метод Річардсона. Розглядається алгоритм вирішення задачі за розрахунком рівня забруднення робочих зон біля штабеля вугілля. Наводиться опис структури створеного комплексу комп'ютерних програм.

Ключові слова: робоча зона, пилове забруднення, штабель вугілля, комп'ютерне моделювання.

Annotation. Coal dust leakage from coal stacks leads to intensive contamination of the working areas. Therefore, determining level of air pollution near the coal piles for various meteorological situations, when new coal piles are arranged, is an important applied problem. For practice, it is necessary to have quick-calculating mathematical models which take into account the most significant physical processes impacting on formation of contamination zones near the coal piles. Today, to predict the level of air pollution at dust leaking from the coal stacks, the normative technique OND-86 or the Gauss model is used. These forecasting methods make it possible to quickly calculate the contamination zones, but they do not take into account geometric shape of the coal stack and unevenness of the velocity field near it. The subject of this research was creation of a mathematical model for predicting the level of air pollution near coal piles with taking into account the aerodynamics of air flows around them. The purpose of the work was to develop a set of numerical models for quick calculation of the level of air pollution at coal dust leaking from the coal piles with taking into account the uneven emission of dust from different areas of the stack surface. The modelling equations are the three-dimensional mass transfer equation (Marchuk's model) and the three-dimensional equation for the velocity potential. The Marchuk's model allows taking into account rate of the coal dust particles settling, parameters of turbulent diffusion and uneven air flow rate near the coal pile. The Dirac delta function is used for modelling coal dust leaking from various sections of the coal pile. For the numerical solution of the mass transfer equation, a difference splitting scheme is used. On the basis of the three-dimensional equation for the velocity potential, an uneven velocity field near the coal pile is determined. The Richardson method is used for numerical solution of the three-dimensional equation for the velocity potential. An algorithm for solving the problem of calculating a level of contamination of working areas near a coal pile is considered. The description of the structure of the created complex of computer programs is given.

Keywords: work area, dust pollution, coal stack, computer simulation.

Стаття надійшла до редакції 14.08. 2020

Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Т.В. Бунько