

УДК 519.6

© Н.Н. Беляев, Л.Ф. Долина, П.С. Кириченко, В.А. Козачина

**МЕТОД РАСЧЕТА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВОЗЛЕ
ОТВАЛОВ, ИМЕЮЩИХ СЛОЖНУЮ ФОРМУ**

© M. Biliaiev, L. Dolina, P. Kirichenko, V. Kozachyna

**AIR POLLUTION SIMULATION NEAR PILES HAVING
COMPREHENSIVE FORM**

Рассмотрен метод оценки уровня загрязнения воздушной среды возле отвалов, имеющих сложную геометрическую форму. Метод базируется на численном моделировании процесса рассеивания пылевого загрязнения в атмосферном воздухе. Решение задачи по оценке уровня загрязнения воздушной среды основывается на решении задач аэродинамики и массопереноса. Для решения задачи аэродинамики используется модель потенциального течения. Для моделирования переноса пылевого загрязнения в воздушной среде используется уравнение массопереноса Г. И. Марчука. Представлены результаты вычислительного эксперимента.

Розглянуто метод оцінки рівня забруднення повітряного середовища біля відвалів, що мають складну геометричну форму. Метод базується на чисельному моделюванні процесу розсіювання пилового забруднення в атмосферному повітрі. Рішення задачі по оцінці рівня забруднення повітряного середовища ґрунтується на рішенні задач аеродинаміки і масопереносу. Для вирішення задачі аеродинаміки використовується модель потенційної течії. Для моделювання переносу пилового забруднення в повітряному середовищі використовується рівняння масопереносу Г. І. Марчука. Представлені результати обчислювального експерименту.

Вступление. При добыче железорудной руды в Криворожском районе создаются отвалы железорудной породы. Эти отвалы могут иметь сложную геометрическую форму и являются интенсивными источниками загрязнения воз-

душной среды. Это ставит задачу прогноза уровня загрязнения, в частности, для различных размеров отвала, его расположения относительно селитебной зоны, метеоситуаций. Применение метода физического эксперимента для решения таких задач связано с большими финансовыми и временными затратами. Эффективным и альтернативным методом решения, является применение метода математического моделирования [2, 4, 5]. Однако необходимо отметить, что разработка математических моделей для рассматриваемого класса задач, является сложным вопросом. В частности, это связано с тем, что интенсивность пыления и формирование зон загрязнения зависит от комплекса факторов, например:

1. возраста отвала;
2. метеоусловий;
3. влажности породы;
4. формы отвала и т.д.

Естественно, учесть в математической модели все факторы – крайне сложно, вдобавок, даже создав такую модель, возникнет проблема обеспечения ее входными данными. Поэтому, для практики важно иметь математические модели, обеспечивающие быстрое получение прогнозных данных на основе которых можно «диагностировать» обстановку возле отвалов для различных метеоситуаций и т.п.

Целью данной работы является разработка метода расчета пылевого загрязнения атмосферного воздуха возле отвалов, имеющих сложную геометрическую форму.

Постановка задачи. Рассматриваются отвалы горнодобывающей отрасли. Полагается, что с поверхности отвала происходит процесс пыления, интенсивность пыления – известна. Необходимо определить интенсивность пылевого загрязнения в зоне влияния отвала с учетом его геометрической формы, параметров метеоситуации.

Математическая модель. Для оценки уровня пылевого загрязнения воздушной среды в рабочих зонах, расположенных возле отвала будем использовать уравнение массопереноса (профильная задача) [1-3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_{ij}(t) \delta(r - r_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где C – концентрация примеси (пыли) в атмосферном воздухе;

u, v – компоненты вектора скорости ветрового потока;

w_s – скорость оседания пылевого загрязнителя;

(μ_x, μ_y) – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии;

Q – интенсивность выброса пыли от различных участков отвала;

$\delta(r - r_i)$ – дельта-функция Дирака;
 $r_i = (x_i, y_i)$ – координаты источника эмиссии пыли.

Ось Y направлена вертикально вверх.

Интенсивность пылевыведения от каждого участка отвала моделируется с помощью дельта-функции Дирака. В модели можно учитывать что интенсивность пылевыведения зависит от локальной скорости ветра и от других параметров, например от влажности того или иного участка отвала. При различной влажности интенсивность пылевыведения Q – будет различна и будет изменяться не только на различных участках, но и с течением времени.

В математической модели будем учитывать неравномерный профиль скорости набегающего на отвал ветрового потока и неравномерность коэффициентов турбулентной атмосферной диффузии:

$$u = u_1 \left(\frac{y}{y_1} \right)^n, \quad \mu_y = 0.11y, \quad \mu_x = 0.2u,$$

где u_1 – скорость ветра на высоте $y_1 = 10 \text{ м}$, $n = 0.15$.

Для расчета поля скорости ветрового потока при обтекании отвала применяется трехмерное уравнения для потенциала скорости P [1, 4]:

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

Компоненты вектора скорости потока определяются соотношениями:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

Постановка краевых условий для моделирующих уравнений рассмотрена в работах [1, 2].

Для численного интегрирования уравнения для потенциала скорости – метод А. А. Самарского. Предварительно уравнение (2) приводится к эволюционному виду

$$\frac{\partial P}{\partial \eta} = \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2}, \quad (4)$$

где η – фиктивное время.

При $\eta \rightarrow \infty$ решение уравнения (4) будет стремиться к «установлению», т.е. к решению уравнения (2).

Разностные уравнения для данного метода записываются в виде:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{0.5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} +$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}, \\
\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = & \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \\
& + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}.
\end{aligned}$$

Как видно из записи приведенных разностных уравнений, процесс численного интегрирования уравнения (4) расщепляется на два шага. На каждом шаге расщепления неизвестное значение величины потенциала скорости P определяется по явной схеме бегущего счета. Вычисления по данным уравнениям заканчивается при выполнении условия

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

где ε – малое число;

n – номер итерации (количество шагов по «времени»).

Для численного интегрирования уравнения массопереноса используется неявная попеременно-треугольная разностная схема [1-3]. Особенностью данной схемы является то, что по построению – это неявная разностная схема, но на каждом шаге расщепления расчет неизвестного значения концентрации осуществляется по явной формуле. На базе применяемых численных моделей разработан пакет прикладных программ «PILE-2DF».

Разработанный пакет прикладных программ построен на модульном принципе. Каждый модуль имеет свое функциональное назначение. Модуль аэродинамики рассчитывает поле потенциала скорости возле отвала. Далее, в этом модуле, осуществляется расчет поля скорости возле отвала. Модуль массопереноса использует данные, полученные в модуле аэродинамики – поле скорости воздушного потока при обтекании отвала. На базе этого поля скорости происходит численный расчет рассеивания пылевого загрязнения возле отвала.

Результаты. Возможности этого пакета программ проиллюстрированы на примере решения модельной задачи. Рассматриваются два отвала имеющие различную геометрическую форму: отвал типа «насыпь» и отвал, имеющий выемку.

На рис. 1 представлено распределение изолиний концентрации пыли возле отвала типа «насыпь». Как видно из рисунка 1 отвал имел сложную геометрическую форму. Эта форма задавалась в численной модели с помощью маркеров. Интенсивность пылевыделения от каждого участка отвала зависела от величины локальной скорости ветра и рассчитывалась на основе эмпирической зависимости.

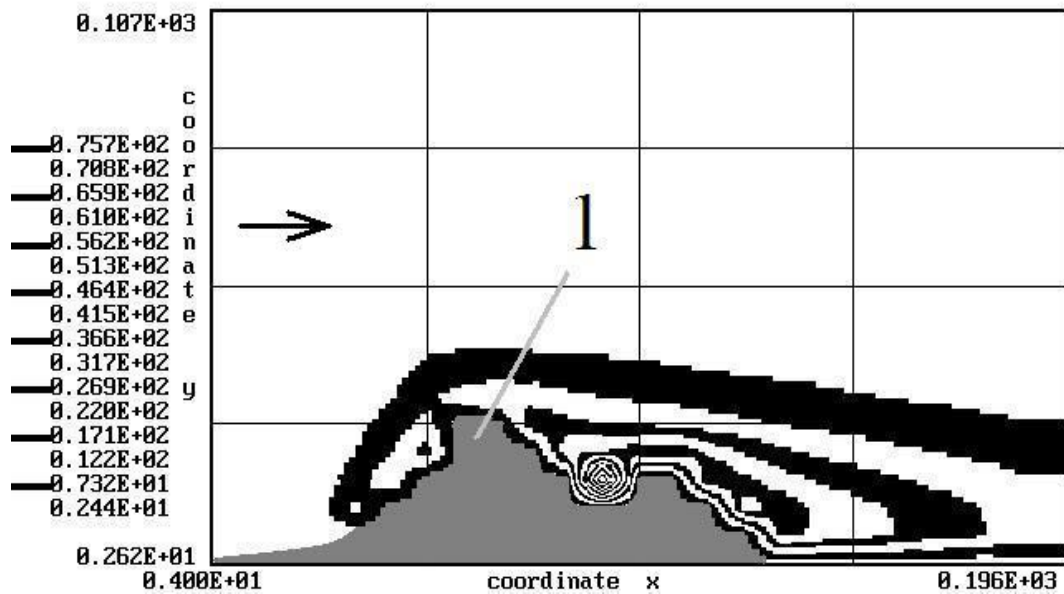


Рис. 1. Зона загрязнения воздушной среды возле отвала: 1 – «насыпь»

Как видно из рис. 1, над отвалом и на подветренной стороне отвала формируется сложная зона пылевого загрязнения. В небольшой выемке, в верхней части отвала, где имеет место локальное торможение воздушного потока, создается застойная зона. Шлейф пылевого загрязнения вытягивается вдоль направления движения воздушных масс и формирует зону пылевого загрязнения за отвалом.

На рис. 2 представлена зона загрязнения воздушной среды возле отвала с выемкой. Главное отличие от предыдущей задачи – это наличие в верхней части отвала нескольких выемок, имеющих различные размеры. Как известно при наличии ряда выемок будет формироваться область течения, где имеет место большая кривизна линий тока. Эта особенность является причиной того, что ряд разностных схем теряют свою устойчивость в таких областях течения. Представленные результаты иллюстрируют то, что в разработанном методе расчета – нет потери устойчивости, при расчете столь сложной картины течения.

Как видно из представленного рисунка возле отвала формируется сложная по форме зона пылевого загрязнения атмосферного воздуха. Хорошо видно как каждый участок пылящегося отвала формирует локальную зону загрязнения. Наличие выемок в верхней части отвала привело к возникновению ряда застойных зон. Эти зоны имеют свои области влияния. Часть пыли выносятся из застойных зон, попадает в основной поток и формирует зону загрязнения на подветренной стороне отвала.

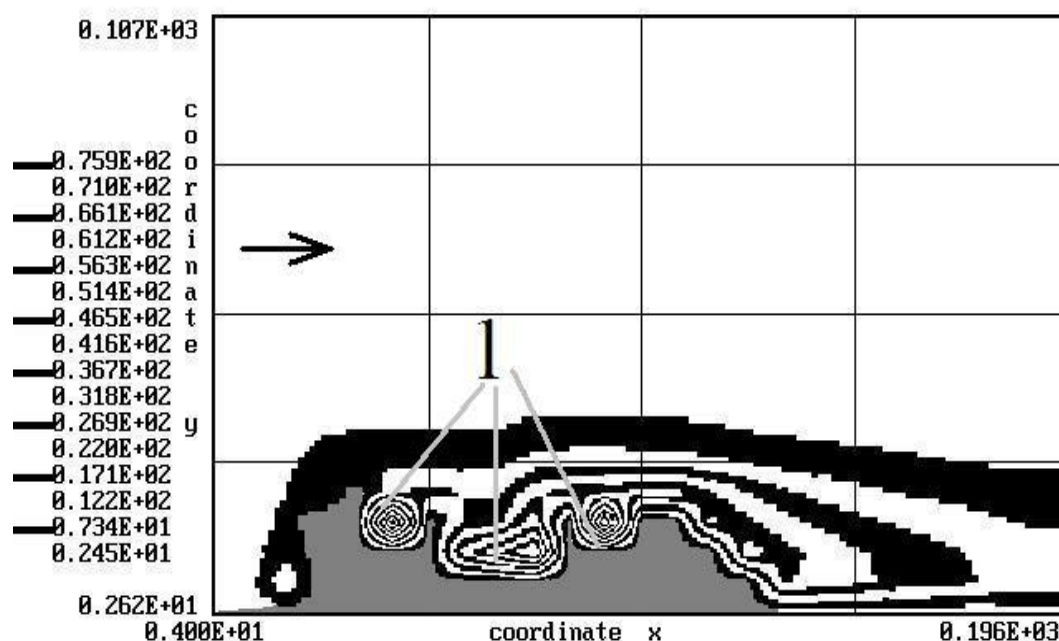


Рис. 2. Зона загрязнения воздушной среды возле отвала: 1 – «выемка»

Необходимо отметить, что для расчета одного варианта задачи требуется компьютерное время 1 с. В этой связи, следует отметить, что разработанный метод расчета удобен для практического использования, поскольку позволяет, в течение одного рабочего дня, провести серийные расчеты, с учетом всех возможных метеоситуаций, характерных для того или иного региона. Выполнив расчеты для возможных метеоситуаций, можно выявить подзоны повышенного пылевого загрязнения и выяснить, как изменяются размеры этих подзон при изменении скорости ветра, состоянии атмосферы и т.д.

Выводы. Предложен эффективный метод моделирования процесса загрязнения воздушной среды возле отвалов. Особенностью метода является учет геометрической формы отвала. Расчет основан на численном моделировании процесса рассеивания пылевого загрязнителя, который выделяется от отвала. Расчет поля скорости ветрового потока возле отвала осуществляется на базе модели потенциального течения. Для расчета рассеивания пыли в атмосферном воздухе применяется уравнение массопереноса. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направлении создания численной модели, учитывающей вихревое движение воздушного потока.

Перечень ссылок

1. Biliaiev, M.M., Gunko, E.Yu., Mashykhina, P.B. (2013). Matematicheskoe modelirovanie v zadachakh ekologicheskoy bezopasnosti i monitoringa chrezvychaynykh situatsiy. Dnipropetrovsk: Aktsent PP.
2. Zgurovskiy, M.Z., Skopetskiy V.V., Khrushch V.K., Biliaiev, M.M. (1997). Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede. Kyiv: Naukova dumka.
3. Biliaiev, M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. Air Pollution Modeling and its Application XXI. NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security, 87-91.
4. Reed, W.R. (2005). Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations. DHHS (NIOSH) Publication (p. 24). Pittsburgh, PA, USA.
5. Diego, I., Pelegry, A., Torno, S., Torano J., Menendez M. (2009) Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles. Applied Mathematical Modeling, 33(7), 3197-3207. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.10.037>

ABSTRACT

The results numerical model to simulate the air pollution near piles of mine wastes.

The purpose of the study is development of quick computing numerical model to calculate the air pollution near piles of mine wastes.

The method: CFD simulation of dust dispersion from piles.

Findings. New numerical model is proposed to compute air pollution with account of pile geometrical form.

The originality. New model was developed for computing of air pollution near pile.

Practical implications. Developed model allows quick computing of air pollution near pile with account of its geometrical form. Results of numerical experiment are presented.

Keywords: *air pollution, pile, dust pollution*