

18. Борн, М. Основы оптики [Текст] / М. Борн, Э. Вольф. – М.: Наука. – 1973. – 720 с.
19. Batrakov, D.O. Solution of a General Inverse Scattering Problem Using the Distorted Born Approximation and Iterative Technique [Text] / D. O. Batrakov, N. P. Zhuck // Inverse Problems. – 1994. – Vol.10, № 1. – P. 39-54.
20. Батракова, А.Г. Методология мониторинга дорожных одежд нежесткого типа с применением георадарных технологий [Текст]: дис... докт. техн. наук. / А.Г. Батракова. – Харьков, 2014. – 397с.
21. Zhuck, N.P. Determination of electrophysical properties of a layered structure with a statistically rough surface via an inversion method. [Text] / N.P. Zhuck, D.O. Batrakov // Physical Review B. – 1995. – Vol.51, №23. – P. 17073-17080.
22. Вагранов, М. Е., Радиолокационный отклик летательных аппаратов [Text] / Вагранов М. Е., Зиновьев Ю. С., Астанин Л. Ю., Костылев А. А., Сарычев В. А., Снежинский С. К., Дмитриев Б. Д. – М.: Радио и связь, 1985. – 320 с.
23. Решение Федеральной комиссии по связи (FCC) США № FCC 02-48 от 14/02/2002 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www/URL: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf](http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-48A1.pdf)

Батракова А.Г. МОДЕЛИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВОЛН В СИСТЕМАХ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ГЕОДЕЗИИ.

В работе проведен анализ волновых явлений, сопровождающих процессы дистанционного зондирования и получения первичных геодезических данных,

в том числе во время изысканий автомобильных дорог и объектов гражданского строительства. На основании данных, приведенных в литературе, показана необходимость учета всего комплекса таких волновых явлений, а именно: дифракции, отражения и рефракции. Предложено использование волнового уравнения в наиболее общей форме, учитывающей, в том числе неоднородность среды, в которой распространяются электромагнитные волны (импульсы).

Ключевые слова: волновые явления, дистанционное зондирование, GPS, рефракция, сверхширокополосный импульсный сигнал

Batrakova A.G. MODELS OF WAVE PROPAGATION IN AEROSPACE GEODESIS SYSTEMS.

Paper is devoted to analysis of the wave phenomena that accompany processes of remote sensing and of obtain primary geodetic data, including activity during developing of highways and objects of civil engineering. Based on the analysis of the data presented in the literature, the need to take into account the whole complex of such wave phenomena, namely: diffraction, reflection and refraction, is shown. It is proposed to use the wave equation in the most general form, taking into account the heterogeneity of the medium in which the electromagnetic waves (impulses) propagates.

Keywords: wave phenomena, remote sensing, GPS, refraction, ultra-wideband pulse signal.

УДК 519.6

Беляев Н. Н., Клименко И. В.

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, (ул. Лазаряна, 2, Днепр, 49000, Украина; e-mail: berlovalexandrr@gmail.com)

Кириченко П. С.

Криворожский национальный университет (ул. Виталия Матусевича, 11, Кривой Рог, 50000, Украина)

РАСЧЕТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВОЗЛЕ ОТВАЛА НА БАЗЕ ЧИСЛЕННОЙ МОДЕЛИ

Предложена 2D численная модель для оценки уровня загрязнения воздушной среды возле отвалов горнорудной промышленности. Разработанная численная модель представляет собой аппроксимацию уравнения массопереноса пылевого загрязнения в атмосферном воздухе. Модель позволяет очень быстро рассчитать поле пылевого загрязнения. Приведено описание алгоритма решения задачи по оценке уровня загрязнения воздушной среды возле отвала. Представлены результаты вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: отвал; загрязнение воздушной среды; распространение пылевых загрязнений; численное моделирование.

Вступление. Многочисленные отвалы породы в Криворожском районе представляют собой долгосрочные и интенсив-

ные источники пылевого загрязнения атмосферного воздуха. Эти отвалы являются побочным продуктом добычи железной

руды в районе. Пыление отвалов происходит в течение нескольких лет, что приводит к отрицательному их воздействию на окружающую среду и жизнедеятельность людей [2, 4, 8]. В этой связи возникает важная задача по оценке уровня пылевого загрязнения окружающей среды загрязнения. Использование метода физического эксперимента для решения таких задач связано с большими финансовыми и временными затратами [7]. Кроме этого, при проведении экспериментов очень сложно экспериментально воспроизвести все те физические факторы, которые влияют на процесс формирования пылевых зон загрязнения: различные метеоусловия, изменение влажности породы со временем и т.д. Также хорошо известно, что при проведении физических экспериментов на модели крайне сложно добиться подобия по числу Re . В этой связи большое значение приобретает применение метода математического моделирования для оценки уровня пылевого загрязнения атмосферного воздуха от отвалов [9, 10].

Целью данной работы является создание метода экспресс оценки уровня пылевого загрязнения атмосферного воздуха от отвалов, позволяющего оперативно, в течении нескольких секунд, получать прогнозные данные об интенсивности загрязнения рабочих и селитебных зон возле отвалов.

Постановка задачи. Рассматриваются отвалы горнорудной отрасли, с поверхности которых происходит процесс пыления и рассеивания примеси (рис. 1). Это могут быть как действующие, так и не действующие отвалы. Необходимо определить концентрационное поле пыли в зоне влияния отвалов, в первую очередь – в непосредственной от них близости, где располагаются рабочие и селитебные зоны.

Математическая модель. Для прогноза уровня загрязнения воздушной среды в рабочих и селитебных зонах, расположенных возле отвалов будет использоваться двухмерное уравнение массопереноса (плановая задача) [1, 3, 5, 6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + kC = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) +$$

$$+ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \sum Q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1)$$

где C – концентрация примеси (пыли и других загрязнителей) в атмосферном воздухе; u, v , – осредненное значение компонент вектора скорости ветрового потока; k – коэффициент, учитывающий скорость оседания пылевого загрязнителя и взаимодействие загрязнителя с поверхностью земли [3]; μ_x, μ_y – коэффициенты атмосферной турбулентной диффузии; Q – осредненное значение интенсивности эмиссии пыли от отвала; $\delta(r-r_i)$ – дельта-функция Дирака; $r_i=(x_i, y_i)$ – координаты источника эмиссии пыли.



Рис. 1. Отвал породы в горнорудном районе

Интенсивность эмиссии пыли от отвалов может быть оценена на основе экспериментальных данных или разработанных методик [4]. Например, интенсивность эмиссии пыли (т/сут) от не действующих отвалов может быть оценена на основе эмпирической зависимости [4]:

$$Q = 2 * 10^{-5} S,$$

где S – площадь поверхности отвала.

Параметры метеоситуаций, характерных для конкретного региона, где расположены отвалы, определяются на основе обработки данных наблюдений или на основе применения данных прогноза метеостанций.

Численное решение задачи. Для численного интегрирования уравнения (1) используется попеременно – треугольная неявная разностная схема расщепления [1,5, 6]. Рассмотрим принцип построения этой схемы.

Конвективные производные представим в виде:

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

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

$$\frac{\partial w C}{\partial z} = \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z},$$

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

Для аппроксимации конвективных производных используем выражения:

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

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

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

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

$$\frac{\partial w^+ C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial w^- C}{\partial z} \approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1},$$

$$\text{где } L_x^+ = \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{ijk}^{n+1} - u_{ijk}^+ C_{i-1,j,k}}{\Delta x},$$

$L_x^- = \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{ijk}^- C_{ijk}^{n+1}}{\Delta x}$, L_y^+ , L_y^- , L_z^+ , L_z^- – обозначение разностных операторов при аппроксимации конвективных производных.

Вторые производные аппроксимируем следующими выражениями:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) \approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1},$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} - \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} = M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}.$$

В данных выражениях

$$M_{xx}^+ = -\mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}; M_{yy}^+; M_{yy}^-;$$

$$M_{xx}^- = -\mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2}; M_{zz}^+; M_{zz}^-$$
 – обозначения разностных операторов при аппроксимации вторых производных.

С учетом этих обозначений, разностный аналог трехмерного уравнения переноса примеси будет иметь вид:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^{n+1} + L_x^- C^{n+1} + L_y^+ C^{n+1} + L_y^- C^{n+1} + L_z^+ C^{n+1} + L_z^- C^{n+1} + \sigma C_{i,j,k}^{n+1} = (M_{xx}^+ C^{n+1} + M_{xx}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1} + M_{yy}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1} + M_{zz}^- C^{n+1}).$$

Производная по времени представляется так: $\frac{\partial C}{\partial t} \approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}$.

При интегрировании на временном интервале dt произведем расщепление данного уравнения следующим образом:

на первом временном шаге $k = n + \frac{1}{4}$:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^+ C^k + L_x^- C^k + L_z^+ C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^k + M_{yy}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{zz}^+ C^k + M_{zz}^- C^k), \quad (2)$$

на втором временном шаге $k = n + \frac{1}{2}$:

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

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2} (L_x^- C^k + L_y^- C^k + L_z^- C^k) + \frac{\sigma}{4} C_{i,j,k}^k = \frac{1}{4} (M_{xx}^- C^k + M_{xx}^+ C^k + M_{yy}^- C^k + M_{yy}^+ C^k + M_{zz}^- C^k + M_{zz}^+ C^k), \quad (3)$$

на третьем временном шаге $k = n + \frac{3}{4}$:

$$c = n + \frac{1}{2}: \text{используется формула (3),}$$

на четвертом временном шаге $k = n + 1$:

$$c = n + \frac{3}{4}: \text{используется формула (2).}$$

На пятом шаге используется формула:

$$\frac{C_{i,j,k}^{5n+1} - C_{i,j,k}^{5n}}{\Delta t} = \sum_{l=1}^N \frac{Q_l (t^{n+1/2})}{\Delta x \Delta y \Delta z} \delta_l$$

Функции δ_l тождественно равняются нулю, кроме ячеек, где расположен первый источник загрязнения.

Численный расчет проводится на прямоугольной разностной сетке. Для формирования геометрической формы отвала, как площадного источника пыления, применяются маркеры [1, 5, 6].

Результаты. На основе построенной численной модели разработан пакет прикладных программ «PILE-2D-K». На рис.2, 3 показано распределение изолиний концентрации пыли в регионе, где расположены два отвала. Расчет выполнен для различных направлений скорости ветра (два сценария). Направление движения воздушных масс показано на рисунках стрелкой.

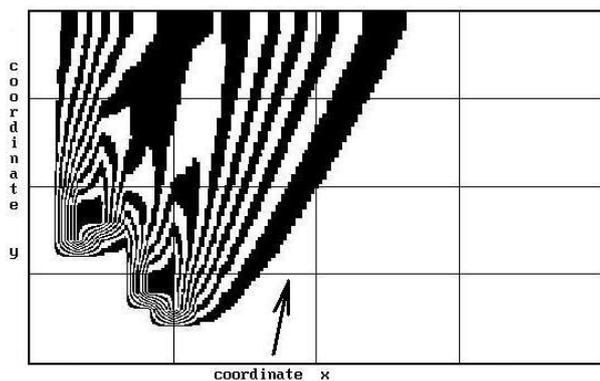


Рис. 2. Зона пылевого загрязнения при юго-западном ветре (первый сценарий)

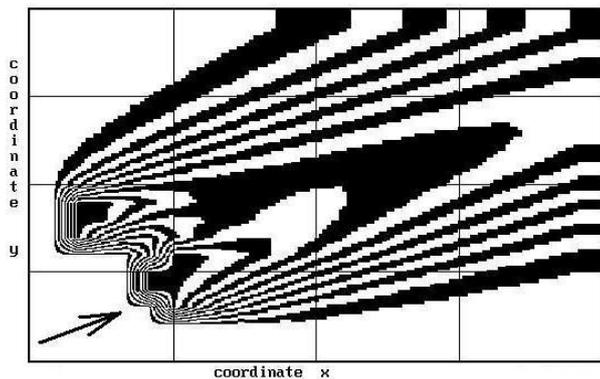


Рис. 3. Зона пылевого загрязнения при юго-западном ветре (второй сценарий)

Положение отвалов хорошо видно на рисунках как место загрязнения с большим градиентом концентрации примеси. Из представленных рисунков видно, что изменение направления движения воздушных масс кардинально изменяет форму, размеры, интенсивность зон пылевого загрязнения возле отвалов, что приводит к различной интенсивности загрязнения селитебных зон возле отвалов. Например, при втором сценарии движения воздушных масс значительная часть территории, расположенной с восточной стороны от отвалов подвергается сильному загрязнению.

Выводы. В работе рассмотрен метод расчета пылевого загрязнения атмосферного воздуха возле отвалов. Расчет основан на численном моделировании процесса рассеивания пылевого загрязнителя, который выделяется от отвала. Для расчета рассеивания пыли в атмосферном воздухе применяется 2D уравнение массопереноса. Дальнейшее совершенствование данного направления следует проводить в направ-

лении создания 3D численной модели, учитывающей вихревое движение воздушного потока.

ЛИТЕРАТУРА:

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. Колесник, В. Е. Математическое моделирование процесса рассеивания промышленной пыли в атмосфере / В. Е. Колесник, Л. А. Головина, В. В. Богущая // 36. наук. пр. НГУ № 26, Том. 2. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2006. – С. 120–130.
3. Марчук, Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г. И. Марчук. – Москва: Наука, 1982. – 320 с.
4. Сборник методик по расчету выбросов в атмосферу загрязняющих веществ различными производствами. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 183с.
5. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К.: Наук. думка, 1997. – 368 с.
6. 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.
7. Cheol-Woo Park, Sang-Joon Lee. Verification of the shelter effect of a windbreak on coal piles in the POSCO open storage yards at the Kwang – Yang works. / Atmospheric Environment, 36 (2002), 2171 – 2185.
8. Mrinal K. Ghose. Emission factors for quantification of dust in Indian coal mines. Journal of Scientific @ Industrial Research, Vol.63, September 2004, pp. 763 – 768.
9. Reed, W.R. Significant Dust Dispersion Models for Mining Operations / DHHS (NIOSH) Publication № 2005 – 138, Pittsburgh, PA, 2005, P. 24.
10. Simultaneous CFD evaluation of wind flow and dust emission in open storage piles / I. Diego, A. Pelegry, S. Torno, J. Torano, M. Menendez // Applied Mathematical Modeling 33 (2009), 3197 – 3207.

Біляєв М. М., Кіріченко П. С., Кліменко І. В. РОЗРАХУНОК ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА БІЛЯ ВІДВАЛА НА БАЗІ ЧИСЕЛЬНОЇ МОДЕЛІ

Запропонована 2D чисельна модель для оцінки рівня забруднення повітряного середовища біля відвалів гірничорудної промисловості. Розроблена чисельна модель являє собою апроксимацію рівняння масопереносу пилового забруднення в атмосферному повітрі.

Модель дозволяє дуже швидко розрахувати поле пилового забруднення. Наведено опис алгоритму розв'язання задачі по оцінці рівня забруднення повітряного середовища біля відвалу. Представлені результати обчислювального експерименту.

Ключові слова: відвал; забруднення повітряного середовища; поширення пилових забруднень; чисельне моделювання.

Biliaiev M. M., Kirichenko P. S., Klimenko I. V.
CALCULATION OF AIR POLLUTION NEAR MINE PILE ON THE BASIS OF THE NUMERICAL MODEL

A 2D numerical model is proposed for estimating the level of air pollution near the mine piles. The developed numerical model is based on equation of pollutant transfer in atmosphere. To solve the modelling equation implicit difference scheme is used. The numerical model makes allows quickly to compute the field of dust pollution near mine piles. A description of the algorithm for solving the problem of assessing the level of air pollution near mine piles is considered. The results of the computational experiment are presented.

Keywords: heap; air pollution; spreading of dust pollution; numerical simulation.

УДК 502.3: 504.5: 629.33

Biliaiev M.M.,

*Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan,
 (Lazaryan str., 2, Dnipro, 49000, Ukraine; e-mail: berlovalexandrr@gmail.com)*

Slavinska O.S., Kyrychenko R.V.

*National Transport University of Ukraine,
 (Omelyanovicha-Pavlenko str., 1, Kyiv, 02000, Ukraine)*

SIMULATION OF POLLUTION DISPERSION FROM ROAD TRAFFIC

Development of numerical model, which allows quick computation air pollution in streets from vehicles. The constructed model based on the equation for the velocity potential (the model of the irrotational flow) and the mass transfer equation. The equation for the velocity potential is used to calculate the velocity field of the air flow in the presence of cars on the road. To solve the equation for the velocity potential, an implicit difference scheme of "conditional approximation" is used. For numerical solution of the mass transfer problem, an implicit alternate-triangular difference scheme is used. The developed model allows to estimate the sizes, the form and intensity of a zone of pollution at a motorway.

Keywords: pollution of the atmosphere; emissions from vehicles; numerical simulation.

Introduction. Road traffic is an intensive source of air contamination in streets. Road traffic emits different pollutants which include carbon monoxide, nitrogen oxides, particulate matter, etc. Changing in city infrastructure will influence the traffic intensity in streets and results in new level of contamination. This level must be predicted at the stage of project developing. Application of physical modeling, in this case, is very expensive [8]. More convenient is mathematical simulation. For quick prediction empirical models are used [1]. These models are convenient in practice, especially when we must run many "pilot" calculations. The lack of these models is that they do not take into account geometrical "features" in streets (presence of vehicles, etc).

Application of CFD models allow to obtain practically all necessary information about air contamination in streets [1,2,6, 8-10]. A lot of modern CFD models are based on Navier – Stokes equations coupled with turbulent

models. Worthy of note, that application of Navier – Stokes equations needs application of very fine computational grid during the computational experiment to simulate in detail the process of vortexes formation and their dispersion and interaction in the region having comprehensive geometrical form. Using the model of viscous fluid (Navier – Stokes equations) we must use very fine grid inside in computational domain and in the boundary layers. This is a real problem if we have large dimensions of the buildings, obstacles in streets. So, in case of Navier – Stokes equations application it is necessary to use powerful PC and every computational experiment consumes much time. This is not convenient when we must run a lot of practical calculations considering different scenario of air pollution in streets and, especially, when we try to find the effective protection measures because in this case we must consider many alternative variants of protection. In this case it would be