

2. Черепанов А.С. Спектральные свойства растительности и вегетационные индексы. / А.С. Черепанов, Е.Г. Дружинина // Геоматика. – 2009. № 3. – С. 28-32.
3. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
4. L. Yan, D.P. Roy. Automated crop field extraction from multi-temporal Web Enabled Landsat Data // Remote Sensing of Environment. – 2014. № 144. – P. 42-64.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бусигінім Б.С.
Надійшла до редакції 15.01.15*

УДК 622.457:519.6

© Н. Н. Беляев, Т. И. Русакова

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЕНТИЛЯЦИИ ТУПИКОВОЙ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ

Разработана численная модель на базе многомерных уравнений аэродинамики и уравнения конвективно-диффузионного переноса примеси. Численное интегрирование моделирующих уравнений проводится с помощью метода Либмана и неявной разностной схемы. Представлены результаты практического применения разработанной CFD модели, позволяющие оценить эффективность проветривания выработки при заданных параметрах вентиляции. Рассчитаны значения концентрации пыли в исследуемой области выработки. Проведен сравнительный анализ изменения концентрации по данному загрязнителю с течением времени.

Розроблено чисельну модель на базі багатовимірних рівнянь аеродинаміки і рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки. Чисельне інтегрування моделюючих рівнянь проводиться за допомогою методу Лібмана і неявної різницевої схеми. Представлено результати практичного застосування розробленої CFD моделі, що дозволяють оцінити ефективність провітрювання виробки при заданих параметрах вентиляції. Розраховано значення концентрації пилу в досліджуваній області виробки. Проведено порівняльний аналіз зміни концентрації за даним забруднювачем з часом.

A numerical model is based on the multi-dimensional equations of aerodynamics and the equation of convection-diffusion pollutant transfer. Numerical integration of modeling equations is performed using the method of Libman and implicit difference schemes. The results of the practical application of the developed CFD model is represented to assess the effectiveness of ventilation in the production of the given parameters of ventilation. The values of dust concentration in the study area were calculated. A comparative analysis of concentration changes of this pollutant in the time were done.

Постановка проблемы и анализ публикаций. Развитие горнодобывающей промышленности основано на повышении интенсивности работ в выработках, что приводит к увеличению пыле- и газовыделений. Это предъявляет высокие требования к эффективности работы вентиляционной системы. Рост объема очистного пространства и интенсивности ведения горных

работ вызывает увеличение в объеме воздуха, при этом требуется рациональное использование подаваемого воздуха. В связи с этим необходимо знать, каким образом происходит изменение концентрации примеси в процессе проветривания выработки. Проветривание подземных выработок относится к одной из наиболее актуальных задач аэрологии в горной промышленности. В рамках этой проблемы следует выделить задачу разработки методов прогноза для расчета времени вентиляции подземных выработок.

В рамках решения данной задачи был достигнут определенный прогресс. Существенный вклад в решение этой проблемы внесли исследователи: Г.В. Калабин, А.А. Бакланов, П.В. Амосов, Н.Ф. Кременчуцкий, Н.Н. Воронин, И.И. Швырков, А.П. Казаков, А.Д. Вассарман, В.И. Голинько, В.Е. Колесник и ряд других. Здесь необходимо подчеркнуть, что существующие методы расчета условно можно разбить на два подхода: первый – применение эмпирических методик, совместно с балансовыми моделями [2]; второй – численные модели на базе уравнений Навье-Стокса, т.е. CFD модели [1]. Первый подход широко используется в инженерной практике, но методы расчета в рамках этого подхода не позволяют учесть ряд важных факторов (форму выработки и аэродинамику процесса вентиляции), полученные при этом результаты хотя и обеспечивают достаточную инженерную точность, но ограничивают их применимость неширокими рамками конкретных ситуаций и условий. Второй подход – очень трудоемкий, он предъявляет высокие требования к пользователю (достаточно глубокие знания аэродинамики и массопереноса), кроме этого моделирование на базе уравнения Навье-Стокса требует мощных компьютеров и больших временных затрат на получение результата, поэтому в настоящее время такой подход не может стать ежедневным инструментом в инженерной практике. Однако второй подход является лидирующим в мировой практике. В последние годы модели вычислительной гидродинамики широко используются инженерами за рубежом для решения задач данного класса. Численное моделирование аэродинамики воздушных потоков в подземных выработках помогает оптимизировать процесс эффективной циркуляции воздуха и удаления загрязнений [6–7].

К сожалению, разработка численных моделей для решения задач по проветриванию подземных выработок осуществляется в Украине не так активно, как за рубежом. Существующие в настоящее время на Украине подходы по расчету параметров проветривания выработок, основываются либо на теоретических положениях, которые требуют постановки экспериментов для определения эмпирических коэффициентов, либо используют величины средней скорости по сечению выработки и постоянные по всему объему коэффициенты турбулентной диффузии. Это не позволяет определить поля концентрации загрязнителей в любое заданное время, а тем самым и контролировать процесс проветривания.

Целью работы является разработка эффективной CFD модели для расчета вентиляции тупиковых выработок, т.е. создание вычислительного инструмента для ежедневного использования в инженерной практике. Этот инструмент с одной стороны учитывает наиболее существенные факторы при проведении

расчетов (форму выработки, наличие породы в выемке, режим вентиляции, процесс гравитационного оседания пыли и т.д., а с другой стороны позволяет получить прогнозные данные в течение нескольких секунд.

Математическая модель. Рассматривается подземная выработка заданных размеров, в которой воздушная среда загрязнена мелкодисперсной пылью известной концентрации C_0 . Вентиляция пространства осуществляется путем подачи чистого воздуха через нагнетательный воздуховод (рис.1). Подача чистого воздуха приводит к уменьшению концентрации пыли в выемке. Ставится задача разработки математической модели для оперативного расчета процесса вентиляции выработки.

Моделирующие уравнения: Для экспресс расчета поля скорости в подземной выработке используется модель потенциального течения. В этом случае моделирующее уравнение имеет вид [3]:

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

где P – потенциал скорости.

При применении данного уравнения полагается, что ось Y направлена вертикально вверх.

Для решения уравнения (1) ставятся следующие граничные условия [3]:

- на стенках выработки, а также на других твердых поверхностях расположенных внутри нее ставится граничное условие вида: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, где n – единичный вектор внешней нормали к твердой стенке;

- на границе выхода воздушного потока из воздуховода $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, где V_n – известное значение скорости воздушного потока;

- на границе, где воздушный поток выходит из выемки (рис.1) $P = P_0 + const$, P_0 – некоторое число (условие Дирихле).

Для моделирования рассеивания пыли в подземной выработке используется уравнение массопереноса [5]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial (v - w_s)C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \frac{\partial C}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \frac{\partial C}{\partial y}) + \sum Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i) \quad (2)$$

где C – концентрация загрязняющего вещества в выемке; u, v – компоненты вектора скорости воздушного потока в выемке; w_s – скорость гравитационного оседания загрязняющего вещества, $\mu = (\mu_x, \mu_y)$ – коэффициенты турбулентной диффузии; (x_i, y_i) – координаты источника выброса загрязняющего вещества; Q_i – интенсивность эмиссии загрязнителя в точке (x_i, y_i) ; $\delta(x - x_i)$, $\delta(y - y_i)$ – дельта-функция Дирака, с помощью которой моделируется поступление загрязнителя в выработку.

Численная модель. Численное интегрирование моделирующих уравнений проводится с использованием прямоугольной разностной сетки. Для численного интегрирования уравнения Лапласа (1) используется метода Либмана [4]. В этом случае аппроксимирующее уравнение имеет вид:

$$\frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta y^2} = 0 \quad (3)$$

Неизвестное значение потенциала определяется по следующей зависимости:

$$P_{i,j} = \frac{\frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1} - P_{i,j-1}}{\Delta y^2}}{\frac{2}{\Delta x^2} + \frac{2}{\Delta y^2}} \quad (4)$$

Для начала расчета по методу Либмана необходимо задать «начальное» значение потенциала скорости в расчетной области, например $P_{i,j} = 0$. При проведении серийных расчетов, поле потенциала скорости, определенное численным путем для одной задачи, может использоваться как «начальное» значение при расчете последующей задачи, с целью минимизации компьютерного времени.

Расчет прекращается при выполнении условия:

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

где ε – малое число (например, $\varepsilon=0.001$); n – номер итерации.

После расчета поля потенциала скорости выполняется расчет компонент вектора скорости на гранях разностных ячеек по зависимостям:

$$u_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}, \quad v_{i,j} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (5)$$

Численное интегрирование уравнения массопереноса проводится с помощью неявной разностной схемы расщепления [5].

На основе построенной численной модели разработан пакет программ «Выработка 2» на языке Фортран.

Результаты. Численный расчет с помощью разработанной модели выполнен при следующих исходных данных: размеры расчетной области, ширина (по координате x) 4 м, высота (по координате y) 4 м; скорость подачи воздуха 0,45 м/с; диаметр трубопровода 0,5 м, скорость гравитационного оседания пыли 0,002 м/с. В начальный момент времени во всей выработке задается равномерная концентрация примеси $C_0=1$ (в безразмерном виде). Подача воздуха для вентилирования осуществляется через воздуховод (рис.1). Волнистой линией показан выход воздушного потока из выработки.

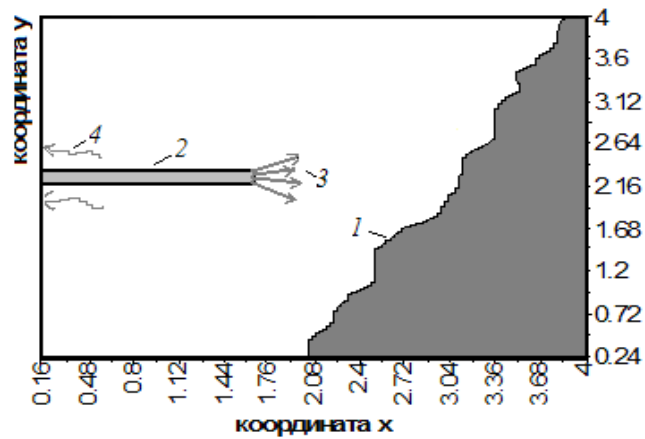


Рис. 1. Схема расчетной области:
 1 – порода; 2 – воздуховод; 3 – подача воздуха;
 4 – выход воздушного потока

На последующих рисунках рис. 2–4 представлено изменение концентрационного поля примеси (пыли) в выработке для различных моментов времени. На этих рисунках значение концентрации представлено в безразмерном виде: каждое число – это величина концентрации в процентах от величины максимальной концентрации на данный момент времени. Вывод на печать чисел осуществлен по формату «целое число», т.е. дробная часть числа не выдается на печать.

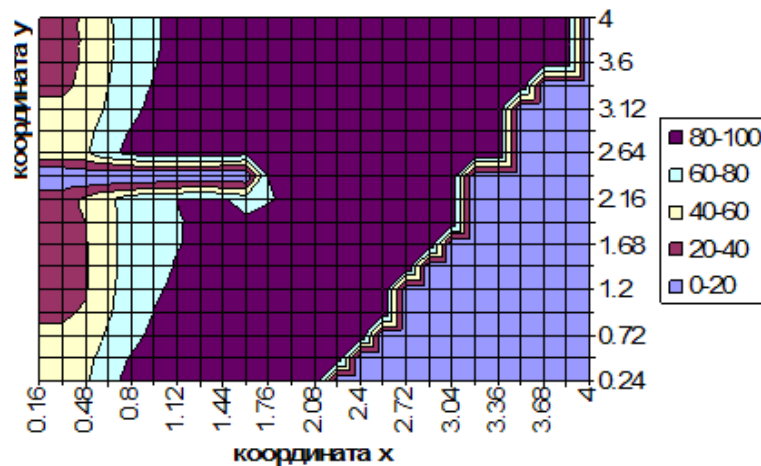


Рис. 2. Поле концентрации пыли: $t=0.1$ с, $C_{\max}=0,9976$

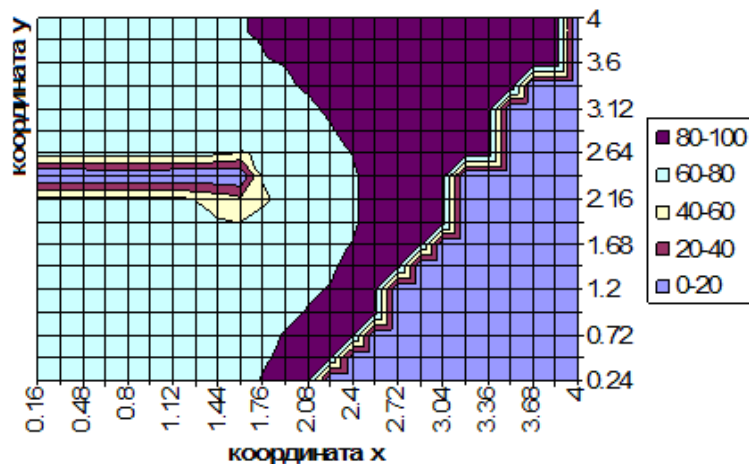


Рис. 3. Поле концентрации пыли: $t=1$ с, $C_{\max}=0,9691$

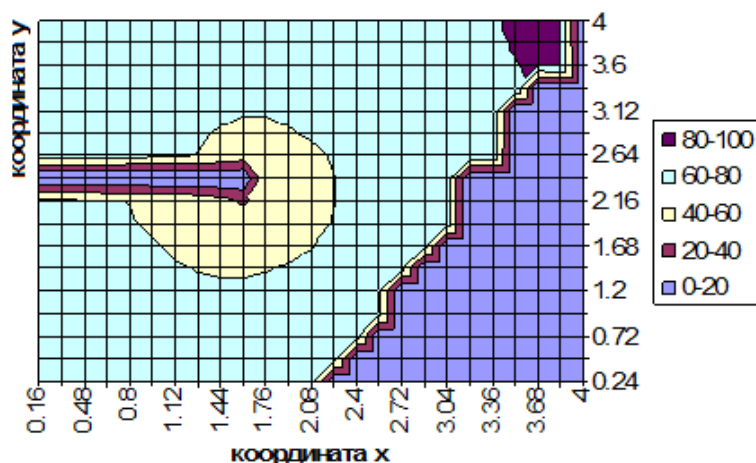


Рис. 4. Поле концентрации пыли: $t=3$ с, $C_{\max}=0,8297$

Хорошо видно, что с течением времени происходит очистка воздушной среды в виде «поршневого» вытеснения пыли из выработки. Также видно, что в верхней части тупиковой выработки для моментов времени $t=3$ с сохраняется зона с повышенной концентрацией примеси 80-100 % (рис. 5.). На рис. 6 показана динамика изменения максимальной концентрации пыли в выработке с течением времени.

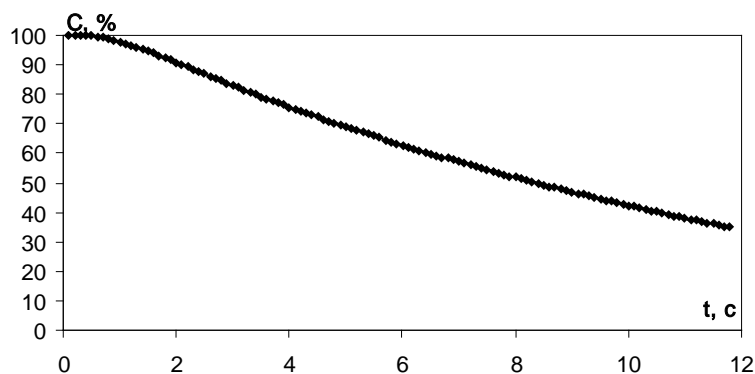


Рис. 6. Изменение концентрации пыли с течением времени

В заключении отметим, что для расчета потребовалось 10 с компьютерного времени.

Выводы. В работе представлена новая CFD модель для оперативного расчета процесса вентилирования тупиковых подземных выработок. Практическая реализация модели требует небольших затрат компьютерного времени. Модель позволяет повысить качество инженерных расчетов. Дальнейшее развитие данного направления связано с созданием трехмерной численной модели процесса вентилирования подземной выработки.

Список литературы

1. Калабин Г.В. Метод расчета аэродинамики камерообразных выработок на основе математического моделирования / Г.В. Калабин, А.А. Бакланов, П.В. Амосов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. – №1. – С.74–88.

2. Кременчуцкий Н.Ф. Расчет проветривания тупиковых выработок с использованием дифференциальных уравнений / Н.Ф. Кременчуцкий, О.А. Муха, Е.В. Столбченко // Науковий вісник НГУ. 2011. – №2. – С.136–139.
3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.
4. 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.
5. Aminossadati, S.M. Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings / S.M. Aminossadati, K. Hooman // In 12th US/North American Mine Ventilation Symposium, 2008. – P. 253-259.
6. Kurnia, J.C. CFD Simulation of Methane Dispersion and Innovative Methane Management in Underground Mining Faces / J.C. Kurnia, A.P. Sasmito, A.S. Mujumdar // Applied Mathematical Modelling, 2014. – P. 253-259.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Голінько В.І.
Надійшла до редакції 20.01.2015*

УДК 622.8:681.518

© В.А. Зберовский

ОПЕРАТИВНАЯ ОЦЕНКА ПОСЛЕДСТВИЙ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА НА ОСНОВЕ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены основные аспекты создания автоматизированной информационно-управляющей системы по экологическому мониторингу окружающей среды, предупреждению и ликвидации техногенно-опасных ситуаций на горно-металлургических комбинатах.

Розглянуто основні аспекти створення автоматизованої інформаційно-керуючої системи з екологічного моніторингу довкілля, попередження та ліквідації техногенно-небезпечних ситуацій на гірничо-металургійних комбінатах.

The main aspects of the creation of an automated information management system for environmental monitoring, prevention and elimination of man-caused dangerous situations on Mining and Metallurgical Combine.

Вступление. Процессы добычи и переработки полезных ископаемых рассматриваются в наше время как мощный источник антропогенного действия на природную среду, что ставит в число первоочередных задач создание современной информационно-аналитической системы для мониторинга окружающей среды и принятия оперативных организационных и инженерно-технических решений относительно предупреждения техногенно-опасных