

С. А. Козырев, П. В. Амосов

## Методический подход к оценке времени проветривания тупиковых выработок на базе трехмерного численного моделирования

Приведены результаты трехмерного численного моделирования процесса проветривания тупиковых выработок различной длины при фиксированном поперечном сечении за счет турбулентной диффузии. Для вычисления аэродинамических характеристик применялась стандартная  $(k - \epsilon)$ -модель турбулентности. Процесс проветривания выработки промоделирован посредством численного решения конвективно-диффузионного уравнения переноса примеси. Численные эксперименты по проветриванию тупиковой выработки длиной от 10 до 20 м выполнены для диапазона расхода воздуха в сквозной выработке от 6,25 до 50 м<sup>3</sup>/с. Начальное загрязнение атмосферы тупиковой выработки принято в интервале 15–25 ПДК (по окислам азота). Для рассмотренных краевых условий получены пространственные распределения скоростного поля и коэффициентов турбулентной вязкости по длине выработки. Выявлена существенная неоднородность поля скорости в тупиковой выработке и низкие значения компонент вектора скорости вблизи забоя, что выводит механизм турбулентной диффузии на доминирующую позицию по рассеиванию примеси. Приведены примеры распределения примеси по пространству выработок на момент достижения уровня ПДК в тупиковой выработке в зависимости от значений варьируемых параметров модели. Установлено, что время проветривания при прочих равных условиях существенным образом зависит от количества воздуха, подаваемого в основную выработку. Показано, что при принятых начальных и граничных условиях прогноз времени проветривания тупиковых выработок посредством механизма турбулентной диффузии может быть выполнен на основе обобщенного аналитического соотношения, аргументами которого являются длина выработки, расход воздуха и начальный уровень загазованности. Анализ результатов численных экспериментов, выполненных на базе созданных 3D-моделей, показал, что тупиковые выработки длиной более 10 м, в которых ведутся очистные работы, могут проветриваться за счет механизма турбулентной диффузии. Время проветривания тупиковой выработки в зависимости от концентрации газов в ней может достигать более двух часов в зависимости от объема подаваемого воздуха в сквозную выработку.

**Ключевые слова:** тупиковая выработка, проветривание, численное моделирование.

### Введение

Проветривание выработок за счет турбулентной диффузии – процесс удаления газов из ниш и камер, расположенных сбоку сквозной выработки, посредством эжектирующего (отсасывающего) действия вентиляционной струи воздуха, проходящей по сквозной выработке. Согласно Правилам безопасности<sup>1</sup> длина тупиковой выработки, проветриваемой только за счет турбулентной диффузии, не должна превышать 10 м, что не всегда удовлетворяет условиям конкретного горного предприятия.

В работе предпринята попытка на базе методов численного моделирования в трехмерной постановке выполнить исследование процесса проветривания тупиковой выработки длиной более 10 м при вариации расхода воздуха через основную выработку и уровня ее начального загрязнения.

### Материалы и методы

#### Постановка задачи

Геометрия моделируемой области, которая включает основную выработку размером 30×5×5 м и перпендикулярную ей тупиковую выработку с тем же самым поперечным размером 5×5 м и изменяющимся размером  $L$  вдоль оси  $Y$  (10, 15 и 20 м), представлена на рис. 1.

Направление воздушного потока в основной выработке выбрано вдоль оси  $X$ . Расход воздуха  $Q$  принят равным 6,25, 12,5, 25 и 50 м<sup>3</sup>/с, что обеспечивает среднюю скорость воздуха на входе в основную выработку от 0,25 до 2 м/с.

Предполагается, что при производстве горнопроходческих работ в тупиковой выработке происходит загрязнение ее атмосферы до концентрации  $C_0$  (15, 20 и 25 ПДК, например, по окислам азота). Протяженность области загазованности вдоль оси  $Y$  составляет 5, 10 и 15 м (отсчет от забоя) при указанном выше диапазоне протяженности тупиковой выработки.

<sup>1</sup> Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых": утв. приказом Ростехнадзора от 11.12.2013 г. № 599, 2014. 122 с.

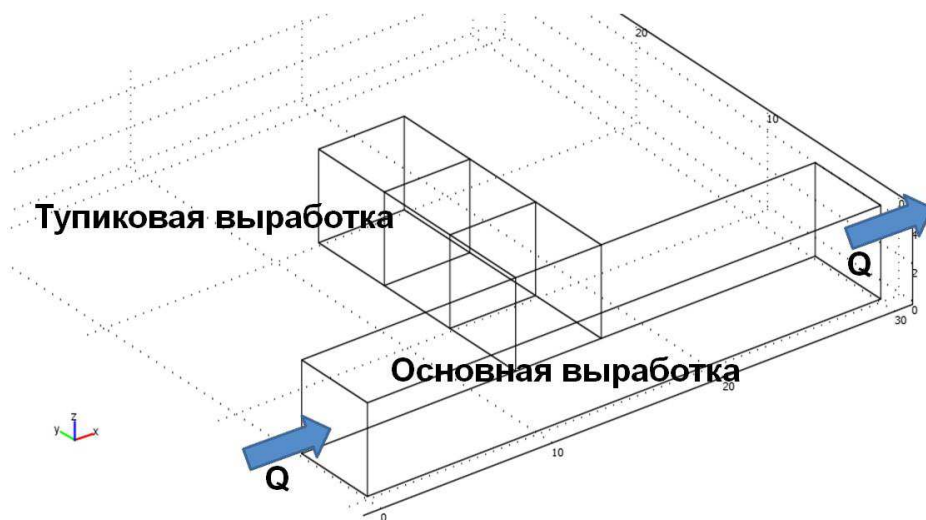


Рис. 1. Геометрия моделируемой области  
(основная выработка 30×5×5 м; тупиковая выработка 5×15×5 м)  
Fig. 1. Geometry of the modelled area  
(the main excavation 30×5×5 м; the blind excavation 5×15×5 м)

### Численная реализация

Как и в предыдущих работах авторов и их коллег [1–4], задача численного моделирования решалась в два этапа. На первом этапе выполнялся расчет аэродинамических характеристик (пространственные распределения скоростного поля и коэффициентов турбулентной вязкости), а на втором – решается нестационарное конвективно-диффузионное уравнение, описывающее процесс выноса пассивной примеси из загазованной части тупиковой выработки до достижения уровня ПДК.

Для вычисления аэродинамических характеристик применяется стандартная ( $k-\epsilon$ )-модель турбулентности. В качестве примера результатов расчетов на первом этапе на рис. 2 изображено скоростное поле в форме векторов, а также по отдельным сечениям приведено распределение турбулентной динамической вязкости. Численные значения (см. легенду) свидетельствуют о том, что в тупиковой выработке прогнозируется именно турбулентный режим (расчетные значения на несколько порядков больше динамической вязкости воздуха).

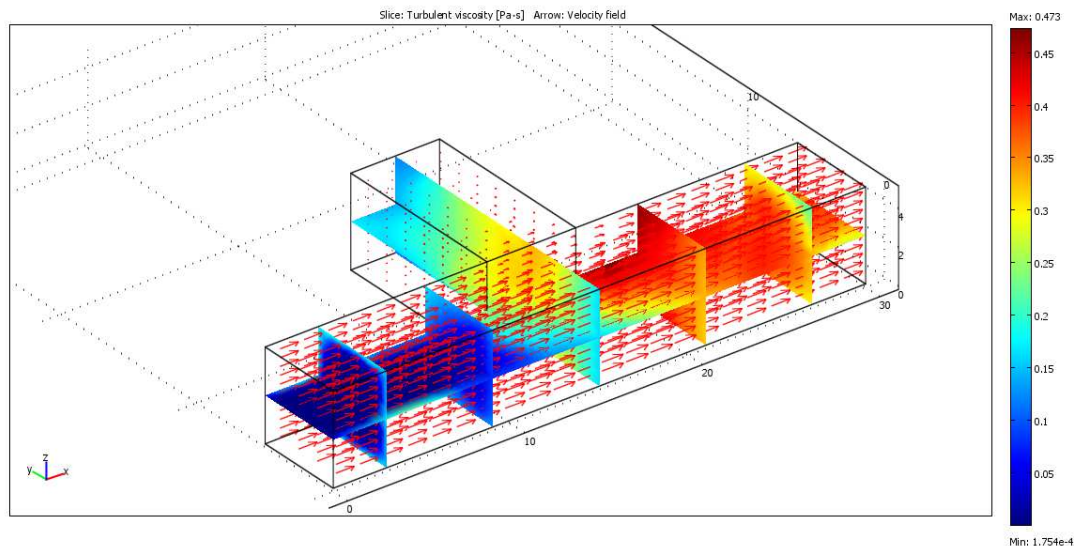


Рис. 2. Расчетное поле скорости и распределение (по отдельным сечениям) турбулентной динамической вязкости  
Fig. 2. Calculated velocity field and distribution (for individual sections) of turbulent dynamic viscosity

На рис. 3 приведено распределение турбулентной динамической вязкости в сечении на полувысоте выработок в плоской постановке. Можно отметить существенную неоднородность поля скорости в тупиковой

выработке и низкие значения компонент вектора скорости вблизи забоя, что выводит механизм турбулентной диффузии на доминирующую позицию по рассеиванию примеси.

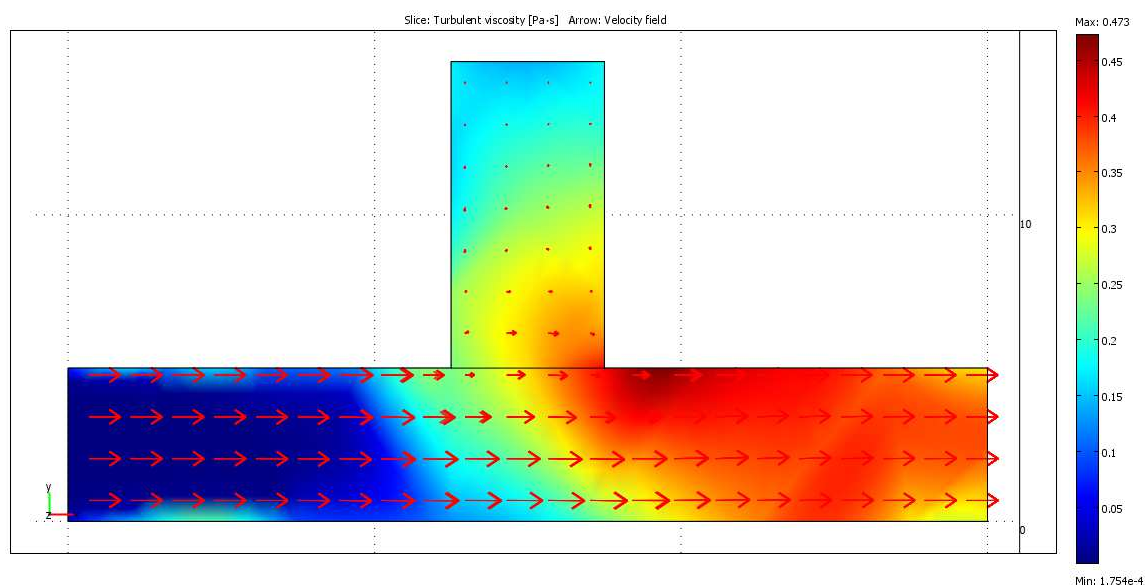


Рис. 3. Расчетное поле скорости и распределение турбулентной динамической вязкости в сечении на полувысоте выработок  
Fig. 3. Calculated velocity field and distribution of turbulent dynamic viscosity in cross-section at half-workings

Для численного решения конвективно-диффузионного уравнения, описывающего процесс проветривания тупиковой выработки, предварительно необходимо выполнить операцию осреднения по объему выработок (основной и тупиковой) турбулентной динамической вязкости. Встроенная опция программного продукта COMSOL позволяет выполнить такую операцию оперативно через интегрирование турбулентной динамической вязкости по объему моделирования. Используя поправки на объем, плотность и число Прандтля – Шмидта [2; 3], находим коэффициент турбулентной диффузии, принимаемый в программе в качестве постоянной величины.

Рассмотрим два графических примера распределения примеси по пространству выработок на момент достижения уровня ПДК в тупиковой выработке при начальном уровне загазованности 20 ПДК. На рис. 4 приведены такие пространственные распределения загрязнения для тупиковой выработки длиной 20 м при вариации расхода воздуха: 6,25 (а) и 50 м<sup>3</sup>/с (б). Сравнительный анализ изображений на рис. 4, а и б свидетельствует о том, что имеются практически одинаковые картины распределения примеси. Основное отличие заключается во времени достижения окончания процесса проветривания: при минимальном расходе (6,25 м<sup>3</sup>/с) время проветривания составляет примерно 22250 с, а при максимальном (50 м<sup>3</sup>/с) – около 2770 с. Таким образом, время проветривания при прочих равных условиях существенным образом зависит от количества воздуха, подаваемого в основную выработку.

Результаты расчетов процесса проветривания тупиковой выработки для фиксированного уровня начальной загазованности в 20 ПДК при вариации расхода воздуха и длины выработки в графической форме представлены на рис. 5: а – зависимости времени проветривания  $T$  (в секундах) тупиковой выработки от расхода воздуха при вариации длины выработки; б – от длины выработки при вариации расхода воздуха.

### Результаты и обсуждение

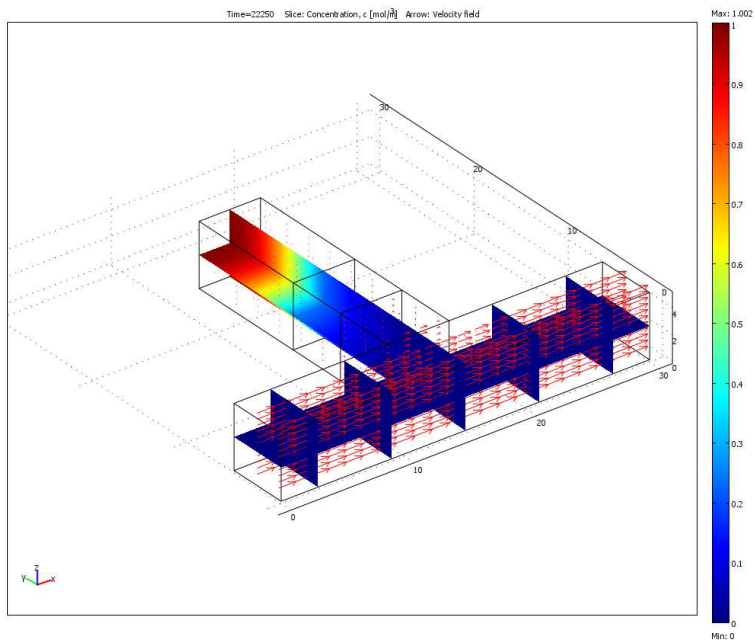
Представленные графические зависимости описываются степенными  $T = A_1 Q^{B_1}$  (рис. 5, а) и экспоненциальными  $T = A_2 \exp(B_2 L)$  (рис. 5, б) функциями, где значения коэффициентов  $A_1, B_1, A_2, B_2$  приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Коэффициенты аппроксимации  $A_1, B_1$  степенных функций  
Table 1. Approximation coefficients  $A_1, B_1$  of power functions

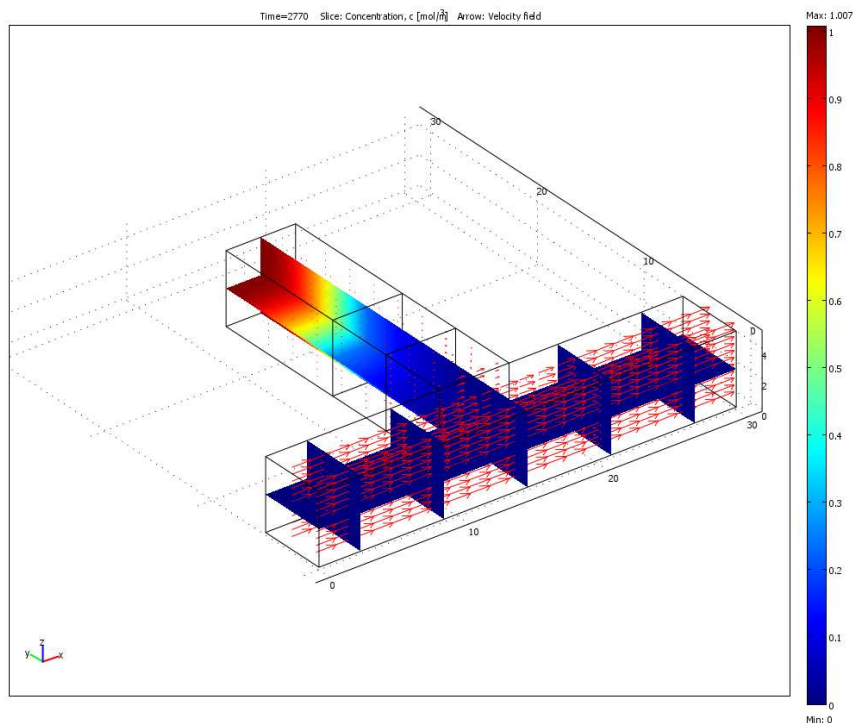
Длина выработки, м	Коэффициент $A_1$	Коэффициент $B_1$
10	11 250	-1,000
15	43 229	-1,003
20	139 759	-1,002

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации  $A_2$ ,  $B_2$  экспоненциальных функций  
 Table 2. Approximation coefficients  $A_2$ ,  $B_2$  of exponential functions

Расход воздуха, м <sup>3</sup> /с	Коэффициент $A_2$	Коэффициент $B_2$
50	18,769	0,2511
25	37,416	0,2514
12,5	74,712	0,2516
6,25	149,730	0,2515



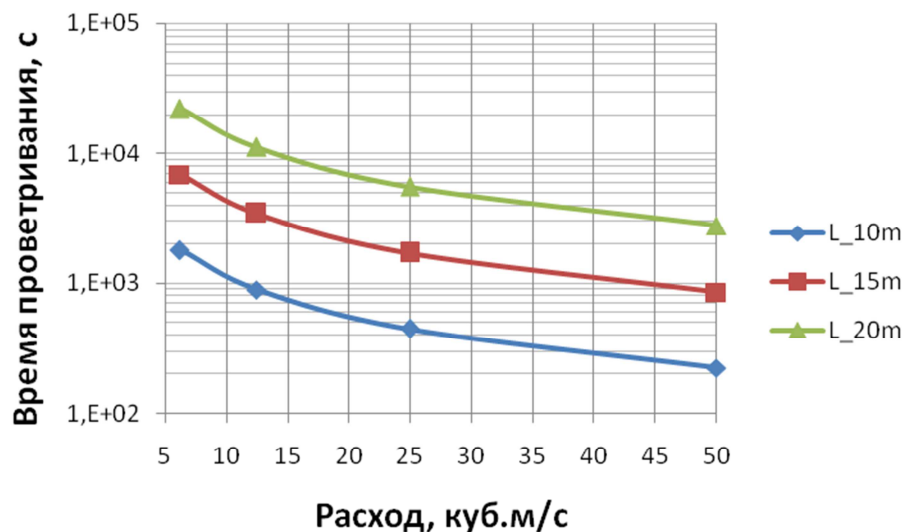
*a*



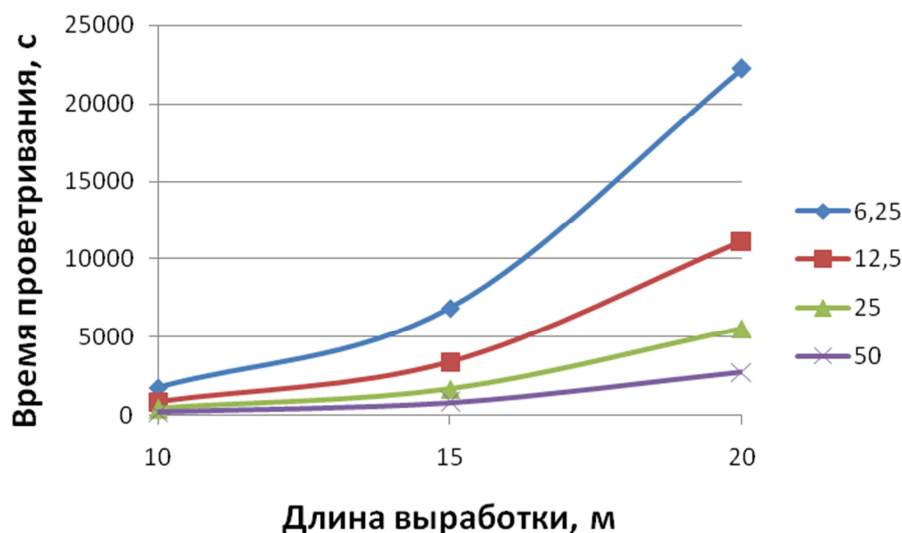
*б*

Рис. 4. Пространственное распределение примеси на момент достижения уровня ПДК при вариации расхода воздуха: *a* – 6,25 м<sup>3</sup>/с; *б* – 50 м<sup>3</sup>/с  
 Fig. 4. Spatial distribution of impurity at the time of achieving the level of MPC at variations in the air flow: *a* – 6,25 м<sup>3</sup>/sec; *б* – 50 м<sup>3</sup>/sec

Из таблиц следует, что коэффициенты  $B_1$  и  $B_2$  достаточно слабо изменяются при вариации длины выработки и расхода воздуха соответственно. Представляется, что с учетом небольшого диапазона изменения коэффициентов  $B_1$  и  $B_2$  к ним вполне допустим подход арифметического среднего. Коэффициенты  $A_1$  и  $A_2$  претерпевают заметные изменения и могут быть описаны экспоненциальной и степенной функциями (коэффициенты достоверности аппроксимации 0,9984 и 1,000 соответственно):  $A_1 = 932 \exp(0,252L)$  и  $A_2 = 932Q^{-0,999}$ .



*a*



*b*

Рис. 5. Зависимости времени проветривания тупиковой выработки от расхода воздуха при вариации длины выработки (*a*) и длины выработки при вариации расхода воздуха (*b*)

Fig. 5. Dependence of time of blind excavation airing on flow rate by varying the length of excavation (*a*) and the length of excavation at air flow rate variations (*b*)

Применяя описанный выше подход к анализу результатов численных экспериментов при вариации начальной концентрации  $C_0$ , можно аналитически описать прогнозируемое время проветривания тупиковой выработки для условий снижения начальной концентрации до ПДК следующими близкими соотношениями (табл. 3). В табл. 3 формулы (1), (3) и (5) соответствуют обработке результатов численных экспериментов по определению времени проветривания  $T$  (в секундах) тупиковой выработки в зависимости от расхода воздуха при вариации длины выработки, а формулы (2), (4) и (6) – от длины выработки при вариации расхода воздуха.

Таблица 3. Вид аналитических зависимостей прогноза времени проветривания тупиковых выработок  
Table 3. View of analytical dependences of ventilation time forecast of blind excavations

Начальная концентрация $C_0$ , ПДК	Аналитическая зависимость	Номер
15	$T(Q, L) = 862Q^{-1,004} \exp(0,2513L)$	(1)
	$T(Q, L) = 862Q^{-1,013} \exp(0,2529L)$	(2)
20	$T(Q, L) = 932Q^{-1,002} \exp(0,2520L)$	(3)
	$T(Q, L) = 932Q^{-0,999} \exp(0,2514L)$	(4)
25	$T(Q, L) = 1\,013Q^{-1,002} \exp(0,2500L)$	(5)
	$T(Q, L) = 1\,013Q^{-1,000} \exp(0,2512L)$	(6)

С физической точки зрения полученные соотношения справедливы. Действительно, при постоянстве всех аэродинамических характеристик модели увеличение начальной концентрации и длины выработки будет способствовать увеличению времени проветривания, а рост расхода, безусловно, должен приводить к сокращению времени проветривания.

В представленных соотношениях значения параметров степенной и экспоненциальной функций изменяются достаточно слабо, значит, есть возможность снова воспользоваться средними значениями, а коэффициент в выражениях, который определяется уровнем начальной концентрации, описать в форме линейного соотношения.

Таким образом, получаем аналитическое выражение, позволяющее оценить время проветривания тупиковой выработки при принятых модельных предположениях для конкретных диапазонов варьируемых параметров  $C_0$ ,  $Q$ ,  $L$  ( $15 \leq C_0 \leq 25$ ) ПДК, ( $6,25 \leq Q \leq 50$ ) м<sup>3</sup>/с, ( $10 \leq L \leq 20$ ) м:

$$T(C_0, Q, L) = (15,1C_0 + 633,6)Q^{-1,003} \exp(0,2511L).$$

Реализованный методический подход может быть использован (с небольшими модификациями), как для других геометрических размеров выработок, так и для других типов описания начальных условий загазованности тупиковой выработки, что позволит прийти к более общей форме прогноза времени проветривания тупиковой выработки для некоторых типовых ситуаций.

### Заключение

На базе построенных компьютерных моделей (в трехмерной постановке) выполнено исследование процессов проветривания тупиковых выработок при вариации длины выработки, расхода воздуха, поступающего в основную выработку, и уровня начальной концентрации загазованности. Для вычисления аэродинамических параметров задействована стандартная ( $k - \varepsilon$ )-модель турбулентности, а процесс проветривания выработки промоделирован посредством численного решения конвективно-диффузионного уравнения пассивной примеси.

Предложена и реализована последовательность действий в ходе анализа результатов численных экспериментов, проведенных при исследовании процесса проветривания тупиковых выработок и выполненных при принятых модельных условиях.

Анализ промежуточных функциональных зависимостей показал, что прогноз времени проветривания тупиковых выработок посредством механизма турбулентной диффузии может быть выполнен на основе обобщенного аналитического соотношения, аргументами которого являются варьируемые параметры (длина выработки, расход воздуха, начальный уровень загазованности).

На основе численных расчетов с использованием трехмерного моделирования показано, что тупиковые выработки длиной более 10 м, в которых ведутся очистные работы, могут проветриваться за счет турбулентной диффузии. При этом время проветривания в зависимости от концентрации газов в выработке может достигать двух и более часов в зависимости от объема подаваемого воздуха в сквозную выработку.

### Библиографический список

1. Бакланов А. А. Численное моделирование в рудничной аэрологии. Апатиты : КФАН СССР, 1987. 200 с.
2. Калабин Г. В., Бакланов А. А., Амосов П. В. Метод расчета аэрогазодинамики плоских камерообразных выработок на основе математического моделирования // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 1. С. 74–88.

3. Козырев С. А., Амосов П. В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. 2012. № 10. С. 79–83.
4. Козырев С. А., Амосов П. В. Моделирование распределения воздушных потоков в глубоких карьерах // Горный журнал. 2014. № 5. С. 7–11.

#### References

1. Baklanov A. A. Chislennoe modelirovanie v rudnichnoy aerologii [Numerical modeling in mine aerology]. Apatity : KFAN SSSR, 1987. 200 p.
2. Kalabin G. V., Baklanov A. A., Amosov P. V. Metod rascheta aerogazodinamiki ploskih kameroobraznyh vyrabotok na osnove matematicheskogo modelirovaniya [Method of calculation of aerogas dynamics of flat room excavations on the basis of mathematical modelling] // Fiziko-tehnicheskie problemy razrabotki poleznyh iskopaemyh. 1990. N 1. P. 74–88.
3. Kozirev S. A., Amosov P. V. Obosnovanie minimalnogo rasstoyaniya ot zaboya provodimoy vyrabotki do kontsa ventilyatsionnyh trub [Substantiation of minimum distance from an excavation face to the end of ventilation pipes] // Bezopasnost truda v promyshlennosti. 2012. N 10. P. 79–83.
4. Kozirev S. A., Amosov P. V. Modelirovanie raspredeleniya vozdushnyh potokov v glubokih karerakh [Modelling of distribution of air flows in deep open pits] // Gornyi zhurnal. 2014. N 5. P. 7–11.

#### Сведения об авторах

**Козырев Сергей Александрович** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, д-р техн. наук, зав. лабораторией; e-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

**Kozyrev S. A.** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Dr of Tech. Sci., Head of Laboratory; e-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

**Амосов Павел Васильевич** – ул. Ферсмана, 24, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия, 184209; Горный институт КНЦ РАН, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник; e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

**Amosov P. V.** – 24, Fersmana Str., Apatity, Murmansk region, Russia, 184209; Mining Institute KSC RAS, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher; e-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

S. A. Kozyrev, P. V. Amosov

### **Estimation of aeration time in blind excavations: Methodological approach based on 3D numerical modeling**

The paper presents the results on 3D numerical modeling of ventilation in blind excavations of different length under the fixed transverse section due to turbulent diffusion. Aerodynamic characteristics have been calculated using the standard ( $k - \epsilon$ )-model of turbulence. The ventilation in an excavation has been simulated by numerical solution of a convectional-diffusion equation of admixture transfer. Numerical experiments of ventilation a blind excavation with 10–20 m length have been performed for range of air consumption in a through excavation from 6.25 to 50 m<sup>3</sup>/sec. Initial contamination of the atmosphere in the blind excavation has been taken in the range of 15–25 MPC (in nitric oxides). For boundary conditions observed there have been received spatial distributions of the velocity field and coefficients of turbulent viscosity in the excavation's length. The authors have revealed significant heterogeneity of the velocity field in the blind excavation and low values of velocity vector's components close to a face; this leads the turbulent diffusion mechanism to a prevailing position in the admixture dispersion. The paper presents examples of admixture distribution in excavations' space at the moment of the MPC level achievement in the blind excavation depending on the values of the model's varying parameters. It has been established that the ventilation time under otherwise equal conditions depends significantly on amount of air supplied to the main excavation. It has been shown that at initial and boundary conditions adopted the forecast of ventilation time for blind excavations through the turbulent diffusion mechanism can be performed based on integrated analytic correlation with such arguments as excavation length, air consumption and initial level of gas contamination. The analysis of numerical test results performed on the basis of 3D models designed has shown that the blind excavations with length more 10 m where stoping operations are running can be ventilated due to the turbulent diffusion mechanism. Time of the blind excavation ventilation in dependence of gases concentration in it can reach more than two hours in dependence of volume of air supplied in a through excavation.

**Key words:** blind excavation, aeration, numerical modeling.