

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ С УЧЕТОМ УТЕЧКИ-ПОДСОСА ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ ЗОНУ ОБРУШЕНИЯ

КОЗЫРЕВ С. А.¹, АМОСОВ П. В.¹

¹ Горный институт Кольского научного центра РАН
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24)

Целью работы является исследование методами численного моделирования процесса проветривания тупиковой выработки, соприкасающейся со стороны торца с обрушенными породами, при наличии утечки-подсоса воздуха через зону обрушения.

Методика. Для компьютерного моделирования в трехмерной реальной геометрии использовалась программа COMSOL. Для вычисления аэродинамических характеристик применялась стандартная ($k-\epsilon$)-модель турбулентности. Процесс проветривания выработки промоделирован посредством численного решения конвективно-диффузионного уравнения переноса пассивной примеси. Численные эксперименты по проветриванию тупиковой выработки длиной 20 м и сечением 18,4 м² выполнены для диапазона расхода воздуха в сквозной выработке от 6,25 до 50 м³/с и величины утечки-подсоса 0; $\pm 0,02$ и $\pm 0,07$ м³/с. Начальное загрязнение атмосферы тупиковой выработки принято равным 25 ПДК (по условным оксидам углерода).

Результаты и обсуждение. Получены пространственные распределения аэродинамических характеристик модели и пространственно-временные распределения примеси. Проанализировано и обобщено до функциональной зависимости время достижения уровня ПДК в тупиковой выработке в зависимости от значений варьируемых параметров модели. Установлено, что подсос воздуха по сравнению с утечкой является более эффективным средством сокращения времени проветривания. Показано, что при принятых начальных и граничных условиях рост расхода воздуха в основной выработке сокращает время проветривания, а расчетные графические зависимости хорошо аппроксимируются степенной функцией. Для ситуации отсутствия утечки-подсоса начальное загрязнение атмосферы тупиковой выработки проваривано в диапазоне от 2 до 25 ПДК. Получена аналитическая зависимость для оценки прогнозного времени проветривания тупиковой выработки за счет турбулентной диффузии.

Ключевые слова: тупиковая выработка; зона обрушения; утечка-подсос; проветривание; численное моделирование.

Введение. Применение высокопроизводительных систем разработки с обрушением руды и покрывающих пород при добыче полезных ископаемых приводит к образованию зон обрушения. Наличие аэродинамической связи горных выработок с поверхностью через зону обрушения оказывает существенное влияние на вентиляционную систему рудника. Утечка или подсос воздуха проявляются в том, что они изменяют количество доходящего до забоев воздуха и нарушают планируемый воздухообмен в блоках и отдельных забоях.

Данные условия характерны для системы разработки с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды. В этом случае проветривание выработок, расположенных сбоку от основной, осуществляется посредством эжектирующего действия вентиляционной струи воздуха, проходящей в основной выработке, проветриваемой за счет общешахтной депрессии. При этом утечка максимально

проявляется в летний, самый тяжелый для вентиляции период года [1], когда более 40 % подаваемого в рудник воздуха теряется, не доходя до эксплуатационных участков, а подсос – в зимний период.

Эффективность выноса вредных примесей из тупикового забоя зависит от геометрических параметров горной выработки и ее длины. Основным параметром, помимо геометрических характеристик выработки, влияющим на эффективность проветривания за счет механизма турбулентной диффузии, является скорость воздуха в примыкающей основной выработке. Утечка-подсос вносят определенные изменения в аэродинамику атмосферы тупикового забоя, что, безусловно, отражается на продолжительности времени его проветривания.

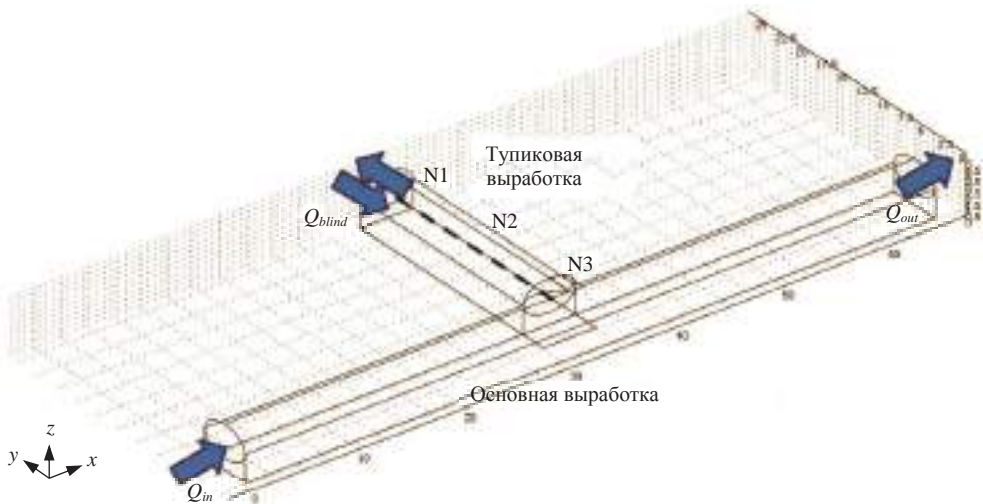


Рис. 1. Геометрия моделируемой области (основная выработка, тупиковая выработка) и точки контроля концентрации загрязнения (N1, N2, N3)
Fig. 1. The geometry of the modeled area (the main excavation, blind excavation) and pollution concentration control points (N1, N2, N3)

Выполненный анализ исследований по проблеме проветривания тупиковых выработок [2–9] показал, что до настоящего времени вопрос проветривания таких выработок, соприкасающихся со стороны их торцов с обрушенными породами, при наличии утечки-подсоса воздуха через зону обрушения изучен недостаточно. В работах [10, 11] процесс проветривания моделировался в объемной, но упрощенной геометрии выработок. Показано, что учет утечки-подсоса действительно сокращает время проветривания и при этом подсос оказывается более эффективным средством по сравнению с утечкой.

В представляемом исследовании отмеченный недостаток в геометрическом представлении выработок [10, 11] устранен и процесс проветривания тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса промоделирован в реальной объемной геометрии.

Постановка задачи. Область моделирования включает основную выработку протяженностью 65 м, сечением 18,4 м² и перпендикулярную ей тупиковую выработку с тем же самым поперечным сечением и длиной 20 м вдоль оси y . Направление воздушного потока в основной выработке выбрано вдоль оси x . Направление утечки-подсоса – вдоль оси y (рис.1).

Согласно федеральным нормам и правилам (*Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых: федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. М.: НИИЦ*

«Недра-XXI», 2015. 160 с.) допускается проветривание тупиковых выработок за счет турбулентной диффузии длиной не более 10 м. Однако наличие в тупиковой выработке утечки-подсоса воздуха переводит процесс ее проветривания в другую категорию, поскольку помимо механизма турбулентной диффузии начинает «работать» целенаправленный конвективный перенос, обусловленный не только движением воздуха по основной выработке. В данной работе рассмотрен процесс проветривания тупиковой выработки длиной 20 м с целью определения возможности ее проветривания за счет турбулентной диффузии.

Применительно к системе разработки с подэтажным обрушением, используемой на подземных рудниках АО «Апатит», для одиночной тупиковой выработки, соприкасающейся с обрушенными породами, по данным депрессионной съемки [1] величина утечки в среднем составляет 0,02–0,07 м³/с. Указанный диапазон значений использован при моделировании процесса проветривания, в том числе и при учете подсоса.

Таблица 1. Осредненные коэффициенты турбулентной диффузии (м²/с) в выработках модели при расходе воздуха $Q_{in} = 50$ м³/с в основной выработке и вариации утечки-подсоса Q_{blind}

Table 1. Average turbulence diffusion coefficients (m²/s) in the excavations of a model under air consumption $Q_{in} = 50$ m³/s in the main excavation under the variation of leakage/inflow Q_{blind}

Q_{blind} , м ³ /с	Основная выработка	Тупиковая выработка
Утечка –0,07	0,0432	0,0673
Утечка –0,02	0,0432	0,0699
0	0,0433	0,0696
Подсос +0,02	0,0433	0,0692
Подсос +0,07	0,0433	0,0684

Расход воздуха, поступающего в основную выработку Q_{in} , проварьирован: 6,25; 12,5; 25,0 и 50,0 м³/с. Для каждого варианта расхода воздуха Q_{in} рассмотрено пять ситуаций, различающихся расходами воздуха через зону обрушения Q_{blind} : базовая (без утечки воздуха $Q_{blind} = 0$); утечка-подсос $Q_{blind} = \pm 0,02$ м³/с; утечка-подсос $Q_{blind} = \pm 0,07$ м³/с.

Геометрическое построение модели, ее наполнение физическими параметрами и численные эксперименты выполнены с помощью программы COMSOL. В процессе расчетов использован двухэтапный методический подход [10, 12]:

1) расчет аэродинамических процессов в горных выработках с привлечением стандартной (k – ϵ)-модели турбулентности и определение осредненного по объему моделирования коэффициента турбулентной динамической вязкости с переходом к коэффициенту турбулентной диффузии через число Прандтля–Шмидта [10, 12];

2) моделирование процесса выноса вредных примесей заданной начальной концентрации из тупиковой выработки посредством решения конвективно-диффузионного уравнения до достижения нормативного уровня концентрации (ПДК) во всей области моделирования.

Выполнено две серии численных экспериментов:

в первой исследовалось влияние утечки-подсоса воздуха на время достижения нормативного уровня ПДК по сравнению с базовой ситуацией $Q_{blind} = 0$ при фиксированном уровне начального загрязнения атмосферы C_0 в объеме тупиковой выработки, равном 25 ПДК (по условным оксидам углерода);

во второй изучался эффект вариации уровня начального загрязнения атмосферы C_0 тупиковой выработки (от 2 до 25 ПДК) на время проветривания исклю-

чительно посредством механизма турбулентной диффузии для базовой ситуации ($Q_{blind} = 0$) при минимальном расходе воздуха в основной выработке.

Результаты интегрирования конвективно-диффузионного уравнения переноса пассивной примеси. В табл. 1 представлены значения осредненных коэффициентов турбулентной диффузии по выработкам для максимального значения расхода воздуха в основной выработке и вариации расхода утечки-подсоса.

Из данных табл. 1 видно, что осредненный коэффициент турбулентной диффузии в основной выработке практически не зависит от величины утечки-подсоса. Влияние утечки-подсоса на величину осредненного коэффициента турбулентной диффузии в тупиковой выработке невелико (не более 4 %).

Для остальных значений расхода в основной выработке работает линейная зависимость: во сколько раз уменьшается расход, в такое же число раз снижается значение осредненного коэффициента турбулентной диффузии.

В качестве примера одного из результатов первой серии расчетов на рис. 2 представлено пространственное распределение концентрации примеси по области моделирования на момент времени 15 мин. Для ситуации, изображенной на рис. 2, приняты значения расхода воздуха по основной выработке $Q_{in} = 6,25 \text{ м}^3/\text{с}$ и величины подсоса $Q_{blind} = +0,07 \text{ м}^3/\text{с}$.

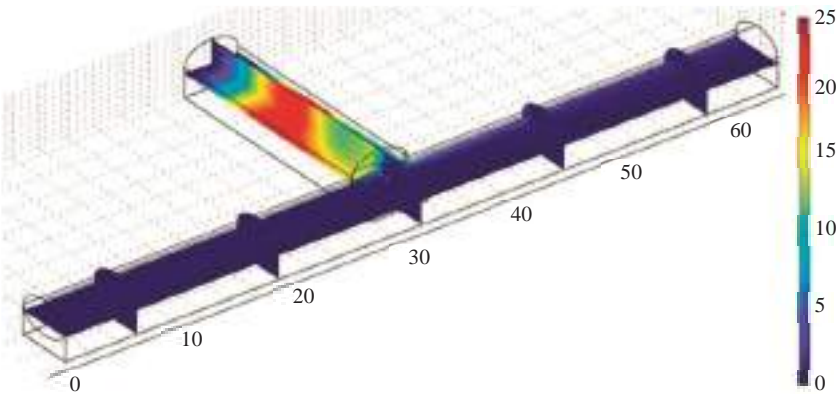


Рис. 2. Пространственное распределение примеси в моделируемом объеме на момент времени 15 минут с учетом подсоса:

$Q_{in} = 6,25 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{blind} = +0,07 \text{ м}^3/\text{с}$; в легенде – концентрация, ед. ПДК

Fig. 2. Spatial distribution of impurity in the modeled volume at the timepoint of 15 minutes with the account of inflow:

$Q_{in} = 6.25 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_{blind} = +0.07 \text{ м}^3/\text{с}$; descriptive data – concentration, MDC

Эффект подсоса воздуха наглядно проявляется при анализе пространственного распределения концентрации примеси во времени: наблюдается постепенное увеличение области «чистой» атмосферы, начиная от торца тупиковой выработки, и вытеснение загрязнения в направлении основной выработки.

Результаты расчетов времени проветривания T в соответствии с указанными расходом воздуха в основной выработке Q_{in} и утечкой-подсосом через торец тупиковой Q_{blind} представлены на рис. 3. Все графики рис. 3 с коэффициентами достоверности, близкими к единице, аппроксимируются степенной функцией $T = A Q_{in}^{-B}$ со своими коэффициентами аппроксимации A и B для рассматриваемых вариантов утечки-подсоса. Значения коэффициентов аппроксимации приведены в табл. 2.

Анализ графиков рис. 3 показывает: максимальное время проветривания имеет место при отсутствии утечки-подсоса. В этом случае время проветривания меняется от самого продолжительного (8 ч) при минимальном значении Q_{in} до ~ 1 ч при максимальном расходе воздуха в основной выработке. При учете утечки-под-

соса имеем существенное снижение времени проветривания. Причем эффект подсоса более существенный. В первую очередь в терминах абсолютных величин этот эффект значителен при малых расходах воздуха в основной выработке.

При минимальном расходе воздуха в основной выработке при утечке $-0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ время проветривания сокращается до $\sim 4,6 \text{ ч}$, тогда как подсос при том же уровне расхода обеспечивает нормативную чистоту атмосферы в тупиковой выработке уже через $\sim 2,2 \text{ ч}$. Дальнейшее увеличение расхода утечки-подсоса до $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ еще более сокращает время проветривания: в случае утечки до $\sim 2 \text{ ч}$, при подсосе – до $\sim 1,5 \text{ ч}$.

При максимальном расходе воздуха в основной выработке при утечке $-0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ время проветривания сокращается с $59,3 \text{ мин}$ до $55,6 \text{ мин}$, тогда как подсос при том же уровне расхода обеспечивает достижение уровня ПДК в тупиковой выработке уже через $16,6 \text{ мин}$. Дальнейший рост расхода утечки-подсоса до $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ приводит к сокращению времени проветривания: в случае утечки до $47,2 \text{ мин}$, а при подсосе – всего лишь до $16,5 \text{ мин}$. Представляется, что действительно, как это и было отмечено в работах [10, 11], в упрощенной геометрии выработок подсос воздуха является более эффективным средством сокращения времени проветривания.

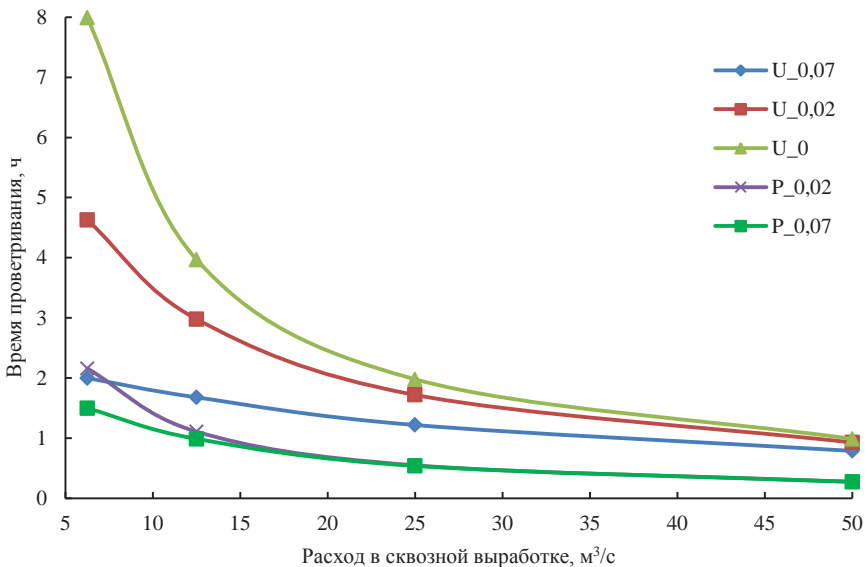


Рис. 3. Прогнозное время проветривания тупиковой выработки в зависимости от расхода воздуха в сквозной выработке с учетом утечки-подсоса через зону обрушения: U – утечка; P – подсос

Fig. 3. Forecast time of a blind excavation ventilation depending on air consumption in through excavation with the account of leakage/inflow through the failure zone: U – leakage; P – inflow

Динамика процесса проветривания в точках контроля, расположенных на центральной оси тупиковой выработки с координатами 5 м (N3), 15 м (N2) и 25 м (N1) – вдоль оси y (рис. 1), представлена на рис. 4. Согласно рис. 4, расход воздуха в основной выработке составляет $12,5 \text{ м}^3/\text{с}$, а величина утечки-подсоса равна $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$.

Анализ результатов для всех расходов воздуха в основной выработке показывает, что поведение кривых динамики концентрации в точках контроля N3 и N2 при наличии утечки-подсоса похоже – монотонное снижение, скорость которого определяется расходами воздуха Q_{in} и Q_{blind}

Максимальное отличие в поведении кривых динамики концентрации имеет место в точке N1. В случае утечки прогнозируется незначительное (не более 0,4 %) повышение уровня концентрации на начальном этапе проветривания, а затем монотонное снижение уровня концентрации, тогда как при подсосе значение концентрации нулевое (поступает чистый воздух).

Заметим, что в точках контроля в процессе проветривания достижение концентрации уровня ПДК наступает значительно раньше, чем это происходит в других областях моделируемого пространства. Именно поэтому при численном интегрировании нестационарного конвективно-диффузионного уравнения переноса пассивной примеси необходимо отслеживать ту локальную область, в которой достижение уровня ПДК происходит в последнюю очередь.

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации степенной функции $T = A \cdot Q_{in}^{-B}$ времени проветривания T тупиковой выработки в зависимости от расхода воздуха Q_{in} в основной выработке при вариации утечки-подсоса Q_{blind}

Table 2. Approximation coefficient of an exponential function $T = A \cdot Q_{in}^{-B}$ ventilation time T of a blind excavation depending on air consumption Q_{in} in the main excavation under the variation of leakage/inflow Q_{blind}

$Q_{blind}, \text{ м}^3/\text{с}$	A	B
Утечка -0,07	4,860	0,44
Утечка -0,02	20,02	0,77
0	50,23	1,00
Подсос +0,02	13,36	0,99
Подсос +0,07	7,258	0,82

Во второй серии расчетов по исследованию влияния уровня начального загрязнения атмосферы C_0 тупиковой выработки на время проветривания T расчеты выполнены для базовой ситуации ($Q_{blind} = 0$) при минимальном расходе воздуха в основной выработке.

График зависимости $T = f(C_0)$ в рассмотренном интервале начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки для расхода воздуха в основной выработке $6,25 \text{ м}^3/\text{с}$ с максимальным коэффициентом достоверности аппроксимируется логарифмической функцией $T = 134,51 \ln(C_0) + 46,066$. Заметим, что именно логарифмическая функция начального уровня загрязнения атмосферы рекомендуется классиками рудничной аэрологии [13–16] при оценке времени проветривания подземных выработок, например после взрывных работ. Этот факт можно рассматривать как дополнительный аргумент объективности результатов и адекватности компьютерной модели. Естественно, что аналогичную процедуру (серию численных экспериментов и обработку результатов расчетов) можно выполнить и для других значений расходов в основной выработке, т. е. выйти на некоторое обобщающее выражение функции нескольких варьируемых переменных, как это сделано в работе [12].

Заключение. На базе построенных компьютерных моделей (в трехмерной постановке и реальной геометрии) выполнено исследование процесса проветривания тупиковой выработки протяженностью 20 м с учетом утечки-подсоса через зону обрушения и показано, что при длине выработок больше 10 м возможно ее проветривание за счет турбулентной диффузии.

В первой серии расчетов при фиксированном уровне начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки 25 ПДК варьировались расход воздуха в основной выработке от $6,25$ до $50,0 \text{ м}^3/\text{с}$ и величина утечки-подсоса через зону обрушения от $0,0$ до $\pm 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$.

Анализ прогнозных значений времени проветривания тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса в рассмотренном диапазоне расходов воздуха свидетельствует:

– подсос воздуха по сравнению с утечкой является более эффективным средством сокращения времени проветривания;

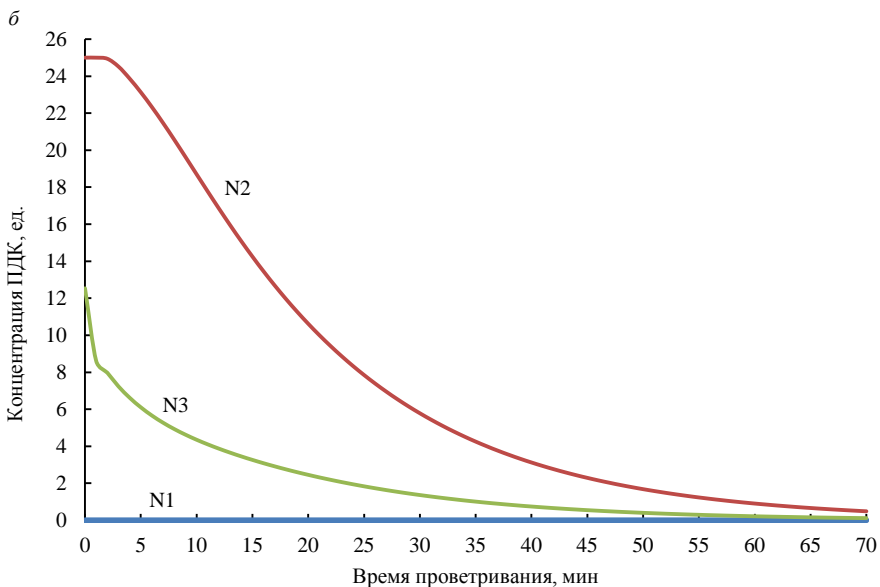
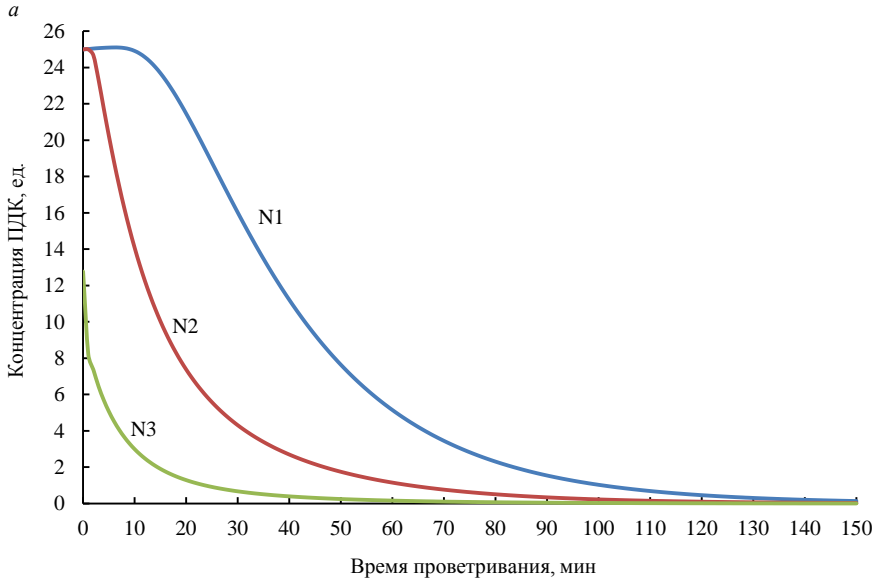


Рис. 4. Динамика концентрации в точках контроля при расходе воздуха в основной выработке $12,5 \text{ м}^3/\text{с}$:

a – утечка $-0,07 \text{ м}^3/\text{с}$; $б$ – подсос $+0,07 \text{ м}^3/\text{с}$

Fig. 4. Concentration dynamics in the control points under air consumption in the main excavation $12.5 \text{ м}^3/\text{с}$:

a – leakage $-0.07 \text{ м}^3/\text{с}$; $б$ – inflow $+0.07 \text{ м}^3/\text{с}$

– рост расхода воздуха в сквозной выработке сокращает время проветривания до достижения ПДК и при этом расчетные графические зависимости хорошо описываются степенной функцией;

– при принятых величинах утечек-подсосов и расходов воздуха наибольшее влияние в абсолютных величинах на время проветривания проявляется при малых расходах воздуха в основной выработке.

Во второй серии численных экспериментов для базовой ситуации отсутствия утечки-подсоса и минимального значения расхода воздуха в основной выработке параметром вариации был уровень начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки от 2 до 25 ПДК.

Показано, что прогнозные значения времени проветривания тупикового забоя посредством механизма турбулентной диффузии при фиксированном расходе воздуха в основной выработке при вариации уровня начального загрязнения атмосферы тупиковой выработки аппроксимируются логарифмической функцией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алехичев С. П., Пучков Л. А. Аэродинамика зон обрушения и расчет блоковых утечек воздуха. Л.: Наука, 1968. 67 с.
2. Шибанов Е. А. Моделирование процесса проветривания тупиковых выработок // Матер. Уральской горнопромышленной декады, 5–15 апреля 2004 г. Екатеринбург: УГГА, 2004. С. 426–431.
3. Росляков А. С., Исаков В. А. Проветривание призабойной зоны тупиковой горной выработки двумя последовательными свободными струями // Известия вузов. Горный журнал. 2011. № 5. С. 57–62.
4. Левин Л. Ю., Исаевич А. Г., Газизуллин Р. Р. Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых забоев различными способами // Научные исследования и инновации. 2011. Т. 5. № 2. С. 127–129.
5. Li X. F., Li Q. Study on the flow numerical simulation of jet ventilation in multi tunnel excavation // Advanced Materials Research. 2012. Vol. 524–527. P. 731–734. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.524-527.731.
6. Левин Л. Ю., Исаевич А. Г., Семин М. А., Газизуллин Р. Р. Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов // Горный журнал. 2015. № 1. С. 72–75.
7. Евстратенко Л. И. Повышение эффективности вентиляции рудников Кривбасса с аэроактивными зонами обрушения: дисс. ... канд. техн. наук. Кривой Рог, 2015. 168 с.
8. Левин Л. Ю., Газизуллин Р. Р., Зайцев А. А. Использование программного модуля ANSYS CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников. URL: <https://sapr.ru/article/22542> (дата обращения 14.01.2016).
9. Feroze T., Genc B. Estimating the effects of line brattice ventilation system variables in an empty heading in room and pillar mining using CFD // The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2016. Vol. 116. No. 12. P. 1143–1152. DOI:10.17159/2411-9717/2016/v116n12a8.
10. Козырев С. А., Амосов П. В. Численное моделирование процесса проветривания одиночной тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2017. № 14. С. 291–294.
11. Kozыrev S., Amosov P. Numerical modelling of blind excavation ventilation taking into account failure zone // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2017. Vol. 17. No. 13. P. 591–598. ISBN 978-619-7105-00-1. DOI:10.5593/sgem2017/13.
12. Козырев С. А., Амосов П. В. Методический подход к оценке времени проветривания тупиковых выработок на базе трехмерного численного моделирования // Вестник МГТУ: Труды Мурманского государственного технического университета. 2017. Т. 20. № 1/1. С. 5–12.
13. Дуганов Г. В., Дробница В. Ф., Никитин И. П., Дребница А. В. Проветривание тупиковых выработок большой длины. М.: Недра, 1968. 75 с.
14. Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Медведев И. И. Рудничная аэрология. М.: Недра, 1978. 440 с.
15. Ушаков К. З., Бурчаков А. С., Пучков Л. А., Медведев И. И. Аэрология горных предприятий. М.: Недра, 1987. 421 с.
16. Рудничная вентиляция: справочник / под ред. К. З. Ушакова. М.: Недра, 1988. 440 с.

Поступила в редакцию 19 апреля 2018 года

Для цитирования: Козырев С. А., Амосов П. В. Исследование процесса проветривания тупиковой выработки с учетом утечки-подсоса воздуха через зону обрушения // Известия вузов. Горный журнал. 2018. № 8. С. 125–134.

Сведения об авторах:

Козырев Сергей Александрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий лабораторией Горного института Кольского научного центра РАН. E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Амосов Павел Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Горного института Кольского научного центра РАН. E-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru

INVESTIGATION OF A BLIND EXCAVATION VENTILATION TAKING INTO ACCOUNT AIR LEAKAGE/ INFLOW THROUGH THE FAILURE ZONE

Kozyrev S. A.¹, Amosov P. V.¹

¹ Mining Institute KSC RAS, Apatity, Russia.

Research aim is to investigate with the methods of numerical modeling the process of ventilation of a blind excavation which touches the broken-down rock with air leakage/inflow through the failure zone.

Methodology. For computer modeling in 3D actual geometry, COMSOL program has been used. To calculate the aerodynamic characteristics, a standard (k - ϵ)-model of turbulence was used. The ventilation of the excavation has been modeled with a numerical solution of the convective-diffusion equation of the passive impurity transport. Numerical experiments on a blind excavation ventilation with the length of 20 m and cross-section of 18.4 m² have been carried out for the range of air consumption in the through excavation from 6.25 to 50 m³/s and the value of leakage/inflow 0; ± 0.02 and ± 0.07 m³/s.

Results and discussion. Spatial distributions of the model's aerodynamic characteristics and spatial-temporal distributions of the impurity have been obtained. The times for reaching the MPC level in the blind excavation depending on the values of the variable parameters of the model have been analyzed and generalized to the functional dependence. It has been established that air inflow in comparison with a leakage is a more effective means of reducing ventilation time. It is shown that, with the initial and boundary conditions accepted, the increase in air consumption in the main excavation reduces the ventilation time, and the calculated graphical dependencies are well approximated by the power function. With no air leakage/inflow, the initial atmosphere pollution of a blind mine excavation has been varied within 2 and 25 MDC. An analytical dependence has been obtained for estimating the predictive ventilation time for the blind excavation due to turbulent diffusion.

Key words: blind excavation; failure zone; leakage/inflow; ventilation; numerical modelling.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-8-125-134

REFERENCES

1. Alekhichev S. P., Puchkov L. A. [Aerodynamics of failure zones and calculation of air leakages in blocks]. Leningrad, Nauka Publ., 1968. 67 p.
2. Shibanov E. A. [Modeling the ventilation of blind excavations. Proc. Ural Mining Decade, April 5th–15th]. Ekaterinburg, UrSMU Publ., 2004, pp. 426–431. (In Russ.)
3. Rosliakov A. S., Isakov V. A. [Airing of bottom hole deadlock excavation with two consecutive free streams]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal – News of the Higher Institutions. Mining Journal*, 2011, no. 5, pp. 57–62. (In Russ.)
4. Levin L. Iu., Isaevich A. G., Gazizullin R. R. [Numerical modeling of the processes of mine detrimental impurities removal when ventilating blind excavations using various methods]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii – Scientific Investigations and Innovations*, 2011, vol. 5, no. 2, pp. 127–129. (In Russ.)
5. Li X. F., Li Q. Study on the Flow Numerical Simulation of Jet Ventilation in Multi Tunnel Excavation. *Advanced Materials Research*, 2012, vol. 524–527, pp. 731–734. DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.524-527.731.
6. Levin L. Iu., Isaevich A. G., Semin M. A., Gazizullin R. R. [Dust air mixture dynamics investigation when ventilating a blind excavation in the process of combine systems operation]. *Gornyi zhurnal – Mining Journal*, 2015, no. 1, pp. 72–75. (In Russ.)
7. Evstratenko L. I. [Improving the ventilation efficiency of Kryvbas mines with aeroactive failure zones. Cand. eng. sci. diss.]. Kryvyi Pih, 2015. 168 p.
8. Levin L. Iu., Gazizullin R. R., Zaitsev A. A. [Using ANSYS CFX software module to solve scientific and production tasks of mines and shafts ventilation]. Available at: <https://sapr.ru/article/22542> (Access date January 14th, 2016).
9. Feroze T., Genc B. Estimating the effects of line brattice ventilation system variables in an empty heading in room and pillar mining using CFD. *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2016, vol. 116, no. 12, pp. 1143–1152. DOI:10.17159/2411-9717/2016/v116n12a8.
10. Kozyrev S. A., Amosov P. V. [Numerical modelling of blind excavation ventilation taking into account failure zone]. *Trudy Fersmanovskoi nauchnoi sessii GI KNTs RAN – Proceedings Fersman Scientific Session of MI KSC RAS*, 2017, no. 14, pp. 291–294. (In Russ.)
11. Kozyrev S., Amosov P. Numerical modelling of blind excavation ventilation taking into account failure zone. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM*, 2017, vol. 17, no. 13, pp. 591–598. ISBN 978-619-7105-00-1. DOI:10.5593/sgem2017/13.
12. Kozyrev S. A., Amosov P. V. [Estimation of aeration time in blind excavations: Methodological approach based on 3D numerical modeling]. *Vestnik MGTU: Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Vestnik of MSTU: Scientific Journal of Murmansk State Technical University*, 2017, vol. 20, no. 1/1, pp. 5–12. (In Russ.)
13. Duganov G. V., Drobnitsa V. F., Nikitin I. P., Drebnitsa A. V. [Long blind excavations ventilation]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 75 p.
14. Ushakov K. Z., Burchakov A. S., Medvedev I. I. [Mining aerology]. Moscow, Nedra Publ., 1978. 440 c.

15. Ushakov K. Z., Burchakov A. S., Puchkov L. A., Medvedev I. I. [Mining enterprises aerology]. Moscow, Nedra Publ., 1987. 421 p.
16. [Reference Book "Mining Ventilation". Edited by Ushakov K. Z.]. Moscow, Nedra Publ., 1988. 440 p.

Information about authors:

Kozyrev Sergei Aleksandrovich – Doctor of Engineering Science, senior researcher, Head of the Laboratory of Mining Institute KSC RAS. E-mail: skozirev@goi.kolasc.net.ru

Amosov Pavel Vasil'evich – Candidate of Engineering Science, senior researcher, leading researcher of Mining Institute KSC RAS. E-mail: vosoma@goi.kolasc.net.ru
