

- Средняя газоносность пород по свободным газам варьируется от 0,07 до 1,73 м³/м³. Максимальное значение средней газоносности пород зафиксировано в породах кровли пласта КрII и составляет 1,73 м³/м³. Минимальное значение, равное 0,07 м³/м³, отмечено в породах подстилающей каменной соли.
- Наименьшая газоносность зафиксирована в породах подстилающей каменной соли на 3 панели СКРУ-3 и составляет 0,10 м³/м³, наибольшая газоносность – на 1 панели СКРУ-1 в породах пласта АБ и составляет 5,03 м³/м³;
- По компонентному составу свободные газы метаново-азотные. Преимущественно на СКРУ-1 и СКРУ-3 фиксировалось значительное процентное содержание водорода в составе свободных газов (до 42,66% в породах пласта В_к на 4 панели СКРУ-1). На некоторых исследуемых участках, а именно на 4 и на 7 панелях БКПРУ-4 и на 2 и 3 панелях СКРУ-1, наблюдается повышенное (свыше 10%) содержание тяжелых углеводородов метанового ряда.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Андрейко С.С. Газодинамические явления в калийных рудниках: методы прогнозирования и способы предотвращения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во. ПГТУ, 2007. – 208 с.
2. Инструкция по эксплуатации планетарных шаровых мельниц тип РМ100/РМ200. Retsch GmbH & Co. KG, Naan, Germany, Doc.Nr. D 98.540/640.9999. –2004. –32 с.
3. Иванов О.В. Методика и результаты определения газоносности соляных пород по связанным газам методом сухой механической дезинтеграции // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 312-314.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2021.3.20

РАСЧЕТ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПРИМЕСЕЙ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ КОНВЕКТИВНО-ДИФфуЗИОННОГО ПЕРЕНОСА

Н.А. Трушкова, С.А. Бублик
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Расчеты распределения газовых примесей в рудничной вентиляционной сети выполняются с целью повышения безопасности ведения горных работ и разработки мероприятий по повышению эффективности проветривания участков сети. Для расчета газораспределения в вентиляционных сетях рудников часто используется модель идеального вытеснения, которая не учитывает процесс диффузии. На рудниках возникают ситуации, когда результаты моделирования газораспределения не согласуются с результатами натурных измерений. Особенно сильно это проявляется на участках с низкими скоростями движения воздуха. В данной работе приведены результаты исследований, подтверждающие необходимость учета диффузии при решении задач газораспределения в рудничных вентиляционных сетях.

Ключевые слова: турбулентная диффузия, модель идеального вытеснения, вентиляционная сеть, скорость воздуха, газораспределение.

Расчет газораспределения выполняется для анализа распространения газовых примесей в моделях рудничных вентиляционных сетей как для штатных, так и для аварийных режимов проветривания [1]. Соответствие результатов моделирования фактическому газораспределению в горных выработках необходимо, так как результаты моделирования газораспределения ложатся в основу разработки мероприятий по повышению эффективности проветривания участков, а также для разработки мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварийных ситу-

аций, связанных с выделением газов. Много исследований посвящено разработке моделей газопереноса. Трехмерные модели описаны в [2-5], однако численное решение полученных математических зависимостей не представляется возможным для реальных вентиляционных сетей. Наиболее часто трехмерная модель применяется при исследованиях газораспределения в тупиковых и прилегающих к ним выработках. На этих участках расчеты выполняются с использованием CFD методов для решения таких задач, как расчет вентиляции тупиковых выработок при применении различных способов проветривания [2] или способов проходки [3], исследование влияния геометрических параметров тупиковой выработки на качество выноса вредных примесей из тупиковой выработки [4], или оценка проветривания выработки за счет турбулентной диффузии и возможность стратификации газоздушонной смеси по высоте выработки [5, 6]. Областью исследования в данных работах являются тупиковые и прилегающие к ним выработки, а расчеты выполнены с использованием CFD методов. Так как на корректность результатов CFD моделирования в значительной степени влияет точность построения геометрии рассматриваемого участка, задание граничных условий, выбор расчетной сетки и других исходных данных, а также для вычисления используется трехмерное моделирование, то процесс расчета становится весьма ресурсозатратным и трудоемким, что делает CFD методы неприменимыми для расчета процессов газопереноса в сложной и разветвленной вентиляционной модели всего рудника.

При расчете газораспределения в одномерной постановке механизм диффузии учитывается в работах [7, 8], но данные исследования посвящены изучению влияния аварийного газовыделения на изменение воздухораспределения и устойчивость движения воздуха в выработках. В работах [9, 10] рассматривается одномерная модель газопереноса со стреловидным профилем скорости потока (модель дисперсии) и вводится понятие коэффициента дисперсии. Также в упрощенном виде модель газопереноса приведена в работе [11]. В рамках упрощенной модели идеального вытеснения диффузия газа отсутствует, эта модель используется для расчета стационарного воздухо- и газораспределения в моделях вентиляционных сетей рудников в настоящее время.

Целью данного исследования является разработка алгоритма расчета распространения газовых примесей с учетом диффузии для повышения точности результатов расчета в горных выработках при низких скоростях движения воздуха и для достижения соответствия расчетных данных с фактической газовой обстановкой на участках.

Используемый в настоящее время в программе «Аэросеть» алгоритм расчета распространения газа не учитывает механизм диффузии, а подразумевает перерасчет элементов массива C_{ij} за счет конвективного переноса в каждом пространственном узле ij (i – номер выработки, j – номер узла в ней) на каждом временном шаге $\Delta t = \Delta x/v$:

$$C_{ij}(t + \Delta t) = C_{i(j-1)}^K(t), \quad (1)$$

где $C_{i(j-1)}^K(t)$ – объемная концентрация газа в $(j-1)$ -м узле i -й горной выработки; Δx – пространственный шаг, м; v – средняя скорость потока, м/с.

Расчет $C_{i(j-1)}^K(t)$ зависит от типа узла j .

1. Центральный. В узле, расположенном в центре выработки с номером $k = 1 + \text{int}\left(\frac{n_i}{2}\right)$, находится источник выделения или поглощения газа $W_i(t)$, если его нет, то $W_i(t) = 0$. Если $k \neq 1$, то:

$$C_{ik}(t + \Delta t) = C_{i(k-1)}(t) + \frac{W_i(t)}{Q_i} \tag{2}$$

2. Начальный ($j = 1$). При входе в выработку концентрация газа усредняется соразмерно расходам входящих потоков воздуха:

$$C_{i1}(t + \Delta t) = \frac{\sum_{e=1, e \neq i}^n C_{em}(t) Q_e}{\sum_{e=1, e \neq i}^n Q_e}, \tag{3}$$

где e – номер инцидентной узлу выработки от 1 до n , m – номер инцидентного узла выработки e , Q_e – расход воздуха в выработке с номером e . Если узел является еще и центральным ($j = k = l$), то добавляется слагаемое $\frac{W_i(t)}{Q_i}$.

3. Начальный поверхностный. Поверхностный узел моделирует атмосферу, поэтому при прохождении через него концентрация газа в воздухе обнуляется: $C_{il} = 0$. Если $k = 1$, то добавляется $\frac{W_i(t)}{Q_i}$.

4. Внутренний. Для всех остальных участков $C_{ij}(t + \Delta t) = C_{i(j-1)}(t)$.

Подобный подход правомерен при соблюдении трех условий.

1. Скорость движения воздуха значительно больше, чем скорость турбулентной диффузии, что позволяет пренебречь диффузионным переносом газовой примеси в продольном направлении.

2. Длина выработок значительно больше их поперечного размера, что является условием корректности одномерной постановки задачи, в рамках которой работает модель идеального вытеснения.

3. Выделившийся из источника W газ достаточно быстро (на достаточно коротком отрезке горной выработки) диффундирует в воздушной среде, так что его концентрация становится однородной по всему поперечному сечению выработки.

Зачастую в условиях действующих рудников соблюдаются все эти условия и результаты моделирования хорошо согласуются с результатами натурных замеров. На рисунке 1 приведены результаты расчета газораспределения в горных выработках рудника при применении модели идеального вытеснения.

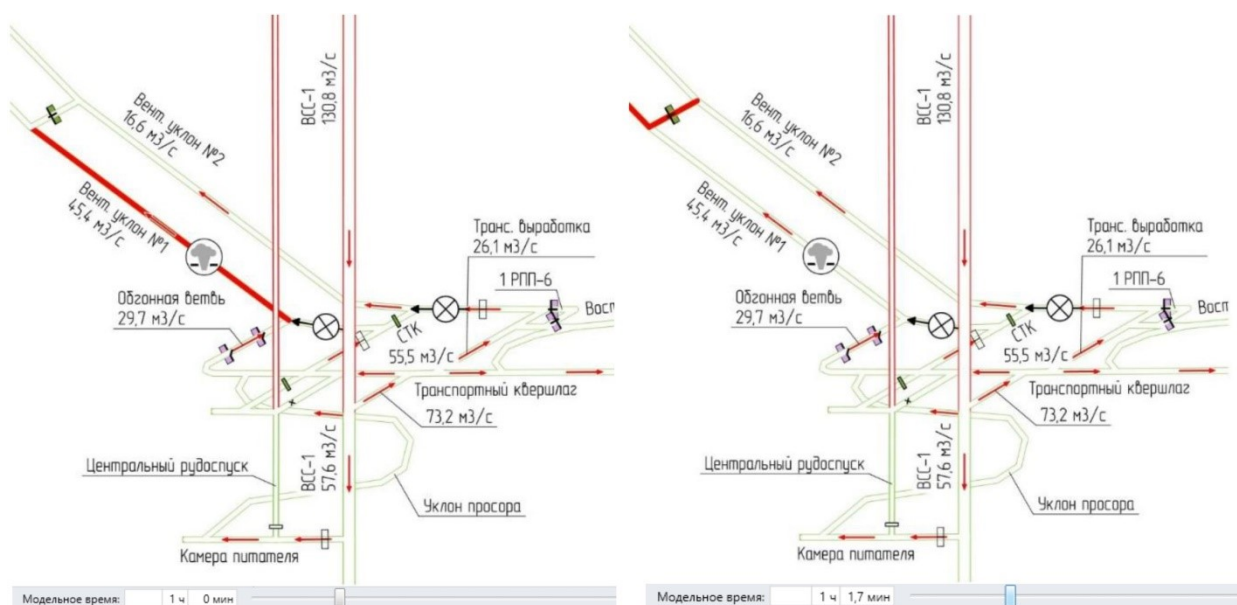


Рис. 1. Результат расчета газораспределения при применении модели идеального вытеснения

Результаты расчета в модели вентиляционной сети показывают, что при возникновении газовой выделения газовые примеси удаляются из вентиляционного уклона № 1 за 1,7 минуты вместе с воздушным потоком при скорости движения воздуха 2,2 м/с, что согласуется с фактической ситуацией на руднике. Аналогичная ситуация наблюдается во всех воздухоподающих выработках (уклонах, заездах, вентиляционных восстающих и т.д.), где, как правило, наблюдается достаточно интенсивная скорость движения воздуха, составляющая более 2 м/с.

В местах сопряжения воздухоподающих выработок и выработок добычного участка происходит разделение потока воздуха, сопровождающееся падением скорости его движения, внутри участка происходит дополнительное разветвление потоков, сопровождающееся еще большим падением скорости движения воздуха, и возникают условия, когда результат расчета газораспределения в рамках модели идеального вытеснения в горных выработках является некорректным, так как нарушается одно из условий применимости данной модели и скорость движения воздуха в выработках становится ниже скорости турбулентной диффузии.

В качестве примера рассмотрим один из таких случаев, возникающих повсеместно на подсечных горизонтах. Результат расчета распространения газовых примесей показал, что расчетное время удаления газовых примесей из выработок участка после проведения взрывных работ составляет более 5 часов, тогда как фактически снижение концентрации газовых примесей до величин, не превышающих предельно-допустимые значения, составляет не более 60 минут. Результат моделирования проветривания рудника в программе «Аэросеть» при расчете газораспределения с использованием модели идеального вытеснения показан на рисунке 2.

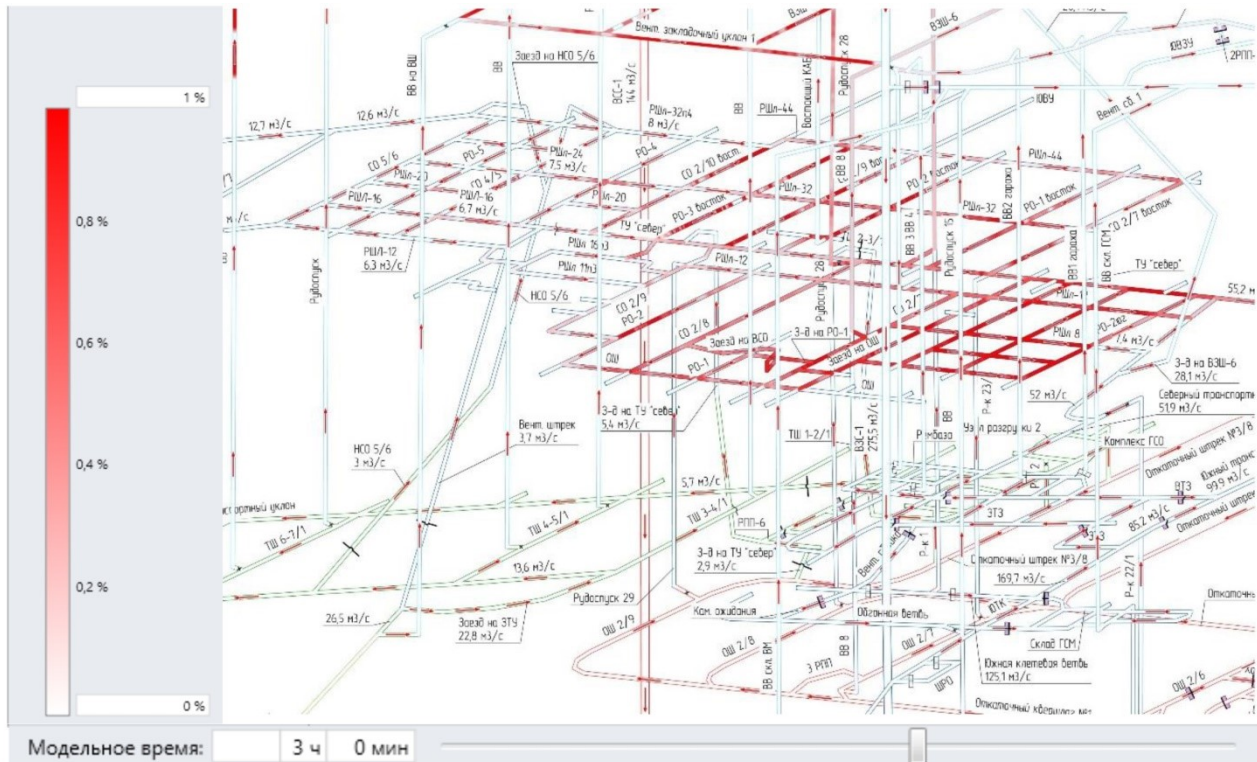


Рис. 2. Результат расчета распространения продуктов горения по горным выработкам при использовании модели идеального вытеснения

По результатам, приведенным на рисунке 2, видно, что через два часа после начала газовыделения в горных выработках горизонта подсежки остаются загазованные участки, по прошествии четырех часов также не происходит полное разгазирование участка, так как в рамках модели идеального вытеснения смешивание потоков воздуха происходит в узлах сети, тогда как скорость выноса газовых примесей из выработок обусловлена только интенсивностью поступательного движения воздуха по ним.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что условие применимости модели идеального вытеснения не соблюдается и скорость воздуха в выработках ниже скорости турбулентной диффузии. Это указывает на необходимость учета продольной турбулентной диффузии газовой смеси при расчете задач газораспределения в сетевой постановке при низких скоростях движения воздуха.

Для решения задач газопереноса с учетом диффузии в сетевой постановке к полученным при расчете конвективного слагаемого значениям $C_{ij}(t + \Delta t)$ на том же временном шаге Δt необходимо добавить слагаемое $\Delta C_{ij}^D(t + \Delta t)$, учитывающее механизм турбулентной диффузии. Уравнение для расчета данного слагаемого основывается на конечно-разностном аналоге уравнения продольной диффузии (дисперсии) и имеет вид:

$$\Delta C_{ij}^D(t + \Delta t) = \frac{(D_t(t))_i \Delta t}{(\Delta L_i)^2} (C_{i(j+1)}(t + \Delta t) - 2C_{ij}(t + \Delta t) + C_{i(j-1)}(t + \Delta t)), \quad (4)$$

где D_t – коэффициент продольной дисперсии, м²/с.

Эта зависимость подходит для внутренних узлов выработок. Если узел первый или последний (или вообще один для короткой выработки с большим расходом), то в формуле вместо $C_{i(j+1)}$ или $C_{i(j-1)}$ берется средневзвешенное по объемам значение концентрации краевых узлов, примыкающих к сопряжению выработок:

$$\Delta C_{i0}^D(t + \Delta t) = \frac{(D_t(t))_i \Delta t}{(\Delta L_i)^2} (C_{i1}(t + \Delta t) - 2C_{i0}(t + \Delta t) + C'_i(t + \Delta t)), \quad (5)$$

$$\Delta C_{in_i}^D(t + \Delta t) = \frac{(D_t(t))_i \Delta t}{(\Delta L_i)^2} (C'_i(t + \Delta t) - 2C_{in_i}(t + \Delta t) + C_{i(n_i-1)}(t + \Delta t)), \quad (6)$$

$$C'_i(t + \Delta t) = \frac{\sum_{e=1, e \neq i}^n C_{em}(t) \Delta L_e S_e}{\sum_{e=1, e \neq i}^n \Delta L_e S_e}, \quad (7)$$

где S_e – площадь сечения выработки с номером e , м².

Однако напрямую использование формулы (4) с шагом по времени Δt и пространственным шагом ΔL , используемыми при расчете конвективного слагаемого, может привести к неустойчивости численной схемы. Это связано прежде всего с тем, что расчет диффузии производится в рамках метода конечных разностей с явной схемой по времени. В этом случае, чтобы расчетная схема была устойчивой, необходимо, чтобы временной и пространственный шаги удовлетворяли критерию устойчивости Куранта-Фридрихса-Леви (КФЛ) для уравнения продольной диффузии [12]. Для обеспечения устойчивости численной схемы расчет диффузионного слагаемого $\Delta C_{ij}^D(t + \Delta t)$ на каждом временном шаге осуществляется итеративно с шагом по времени, который меньше в N_i раз. Тогда расчет слагаемого $\Delta C_{ij}^D(t + \Delta t)$ необходимо проводить следующим образом:

$$\Delta C_{ij}^{\Delta}(t + \Delta t) = \sum_{p=1}^{N_i} \left(\frac{(D_t(t))_i \Delta t}{(\Delta L_i)^2} \frac{\Delta t}{N_i} \left(C_{i(j+1)}^p(t + \Delta t) - 2C_{ij}^p(t + \Delta t) + C_{i(j-1)}^p(t + \Delta t) \right) \right), \quad (9)$$

где p – номер итерации.

Число N_i , на которое происходит уменьшение шага по времени, рассчитывается следующим образом:

$$N_i = \begin{cases} \text{int} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_i^{\Delta}} \right), & \text{если } \text{int} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_i^{\Delta}} \right) \neq 0, \\ 1, & \text{если } \text{int} \left(\frac{\Delta t}{\Delta t_i^{\Delta}} \right) = 0, \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta t_i^{\Delta} = CFL \frac{\Delta L^2}{(D_t(t))_i},$$

где Δt_i^{Δ} – оптимальный (в смысле устойчивости) шаг по времени по критерию КФЛ [12] при расчете диффузионного слагаемого, с; $CFL \leq 0,5$ – константа критерия КФЛ, позволяющая контролировать устойчивость численной схемы при расчете диффузии. Чем меньше задается значение константы CFL , тем лучше будет устойчивость численной схемы, однако при этом увеличивается значение числа подытераций N_i и время расчета возрастает.

Коэффициент дисперсии представляет сумму коэффициента молекулярной диффузии $D_{Molecular}$, коэффициента диффузии Тейлора D_{Taylor} и коэффициента турбулентной диффузии D_t . Молекулярная диффузия определяется физическими свойствами рассматриваемого газа.

Молекулярная диффузия является константой среды, для воздуха она равна около $2 \cdot 10^{-5}$ м²/с. Диффузия Тейлора для турбулентного режима определяется следующим образом [13]:

$$D_{Taylor} = 3,57 \frac{P}{2\pi} v \sqrt{\lambda}, \quad (11)$$

где λ – коэффициент трения; v – средняя скорость потока. м/с; P – периметр выработки, м.

Свяжем коэффициент трения и коэффициент аэродинамического сопротивления через уравнения депрессии в выработке из аэрологии и гидравлики:

$$h = \frac{\alpha PL}{S^3} v^2 S^2 - \text{из аэрологии} \quad (12)$$

$$h = \frac{\lambda L \pi \rho v^2}{P} \frac{1}{2} - \text{из гидравлики}$$

где α – коэффициент аэродинамического сопротивления, Н·с²/м⁴.

В итоге получим выражение для определения коэффициента трения:

$$\lambda = \frac{8\alpha}{\rho}. \quad (13)$$

И таким образом получим окончательный вид выражения диффузии Тейлора:

$$D_{Taylor} = 3,57 \frac{P}{\pi} v \sqrt{\frac{2\alpha}{\rho}}. \quad (14)$$

Величина коэффициента турбулентной диффузии определяется несколько сложнее из безразмерного числа Шмидта, показывающего соотношение интенсивностей турбулентной вязкости и турбулентной диффузии [14]:

$$Sc = \frac{v_t}{D_t}, \quad (15)$$

где Sc – число Шмидта, типовое значение которого для воздуха равно 0,7 [15, 16], v_t – турбулентная кинематическая вязкость, m^2/c .

Значение турбулентной кинематической вязкости определяется из модели турбулентности Спаларта-Аллмареса [15]:

$$\begin{aligned} v_t &= \tilde{\nu} f_{v1}, \\ f_{v1} &= \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3}, \\ \chi &\equiv \frac{\tilde{\nu}}{\nu_k}, C_{v1}^3 = 7.1, \end{aligned} \quad (16)$$

где ν_k – кинематическая вязкость, m^2/c ; $\tilde{\nu}$ – модифицированная турбулентная вязкость, m^2/c ; f_{v1} – коэффициент пропорциональности.

Значение модифицированной турбулентной вязкости можно вычислить так [15]:

$$\begin{aligned} \tilde{\nu} &= \sqrt{\frac{3}{2}} v \cdot I \cdot l, \\ l &= 0,07d, \end{aligned} \quad (17)$$

где I – интенсивность турбулентного потока; v – средняя по сечению скорость воздуха, m/c ; d – диаметр выработки, m .

Интенсивность турбулентного потока устанавливается экспериментальным путем. Значение интенсивности, равное 1% или менее, обычно считается низким; более 10% – высоким. Таким образом, выражая из (15) коэффициент турбулентной диффузии D_t и используя (16), (17) для вычисления турбулентной кинематической вязкости v_t , получим формулу для расчета коэффициента турбулентной диффузии:

$$D_t(I, d) = \frac{\sqrt{\frac{3}{2}} v \cdot I \cdot 0,07d \cdot f_{v1}}{Sc}. \quad (18)$$

Из формул (17) и (18) можно установить, что чем выше интенсивность турбулентного потока, тем выше коэффициент турбулентной диффузии и, соответственно, происходит более интенсивное перемешивание воздушных масс.

Реализация предложенного алгоритма расчета позволит корректно рассчитывать газораспределение при малых скоростях движения воздуха во всех выработках рудника с достаточной точностью как в штатном режиме, так и в аварийных ситуациях. Дальнейшие исследования будут направлены на более детальное рассмотрение влияния диффузионных процессов при решении задач расчета газопереноса в модели вентиляционной сети.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 179-184.
2. Газизуллин Р.Р., Исаевич А.Г., Левин Л.Ю. Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых выработок различными способами // Науч. исслед. и инновации. – 2011. – Т. 5, № 2. – С. 127-129.
3. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15-23. – DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.
4. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Кузьминых Е.Г. Моделирование процесса изменения состава рудничного воздуха в наклонной тупиковой горной выработке // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 79-84. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.
5. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников / УрО РАН. – Екатеринбург, 1992. – 244 с.: ил.
6. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горн. журн. – 2014. – №12. – С. 105-109.
7. Yu J., Li Z., Liu Y., Dong Z., Sun Y. Regularity of Mine Gas Flow Disaster Induced by Gas Natural Ventilation Pressure after Coal and Gas Outbursts // ACS Omega. – 2021. – V. 6, № 30. – P. 19867-19875.
8. Yu J., Li Z., Wang W. Influence of gas outburst dynamic flow on mine ventilation system // AIP Advances. – V. 11, № 7. – Номер статьи 075223.
9. Taylor G. The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. // Proceedings of the Royal Society. – 1954 – V. 233. – P. 446-468. – № 1155.
10. Лайгна К.Ю., Поттер Э.А. О роли турбулентной диффузии и дисперсии при переносе газообразных примесей в шахтных вентиляционных струях и потоках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1988. – № 2. – С. 115-120.
11. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников / УрО АН СССР. – Свердловск, 1990. – 251 с.: ил.
12. Говорухин Ю.М., Криволапов В.Г., Палеев Д.Ю. Исследование аэродинамических особенностей тупиковых выработок, проветриваемых за счет турбулентной диффузии // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 392-400. – DOI: 10/46689/2218-5194-2020-1-1-392-400.
13. Новый справочник химика и технолога: процессы и аппараты химических технологий / ред. Г.М. Островский. – СПб.: Профессинал, 2004. – Ч. 1. – 848 с.
14. Венгеров И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т. 1. Анализ парадигмы. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 632 с.
15. Spalart P.R., Allmaras S.R. One-equation turbulence model for aerodynamic flows // Recherche aerospaciale. – 1994. – № 1. – P. 5-21.
16. Жуков В.П., Боровик И.Н., Строкач Е.А. Численное исследование влияния коэффициентов турбулентной диффузии и турбулентного числа Прандтля на результаты моделирования внутрикамерных процессов в тепловых двигателях // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2020. – №. 4. – С. 139-145.