

сообразно разрабатывать системы по приточной, вытяжной и приточно-вытяжной схемам с разными балансами по подаваемому и удаляемому воздуху.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации в рамках научного проекта № МК-6244.2018.5.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Семин М.А. Математическое прогнозирование микроклиматических параметров в горных выработках нефтяных шахт // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2018. – № 4. – С. 294-309.
2. Николаев А.В., Файнбург Г.З. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок нефтешахт // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – Т. 14, № 14. – С. 92-98.
3. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Термодинамические процессы в горных породах. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 360 с.: ил.
4. Николаев А.В. Способ проветривания уклонных блоков нефтешахт, повышающий энергоэффективность подземной добычи нефти // Нефтяное хозяйство. – 2016. – № 11. – С. 133-136.
5. Николаев А.В. Способ раздельного проветривания уклонных блоков и подземных горных выработок нефтяной шахты // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 20. – С. 293-300.
6. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Оценка эффективности системы распределенной подачи охлажденного воздуха как способа управления микроклиматическими параметрами шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 185-189.
7. Клюкин Ю.А., Семин М.А., Зайцев А.В. Экспериментальное исследование микроклиматических условий и факторов их формирования в нефтяной шахте // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 63-75. DOI: 10.15593/2224-9923/2018.3.6.
8. Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Киряков А.С. Исследование процессов тепломассопереноса в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – Т. 13, № 11. – С.121-129.
9. Zaitsev V., Levin L.Yu., Kazakov V.P., Klyukin Yu.F. Thermotechnical systems for normalization of microclimate parameters in deep mines of Nornickel's Polar Division // Gornyi Zhurnal. – 2018. – № 6. – P. 34-40. DOI: 10.17580/gzh.2018.06.07.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2019.4.24

МОДЕРНИЗАЦИЯ ПРОГРАММЫ АЭРОСЕТЬ В СВЯЗИ С НОВЫМИ ТРЕБОВАНИЯМИ К ПРОВЕДЕНИЮ ИНЖЕНЕРНЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Д.С. КОРМЩИКОВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В статье приведены расчетные и аналитические инструменты, которые потребовалось внедрить в программу «Аэросеть» после вступления в силу Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы». Описаны разработанные алгоритмы расчета водоснабжения, зон поражения при взрыве и пожаре, маршрутов движения в задымленной атмосфере. Приведены примеры их реализации в программе.

Ключевые слова. шахта, рудник, инженерные расчеты, моделирование, вентиляция, Водоснабжение, взрыв, ударная волна, пожар, устойчивость проветривания, аэросеть.

Введение

В конце 2016 года в силу вступил приказ Ростехнадзора №449 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» [1]. Согласно пункту 26 этой инструкции **расчеты**

параметров развития пожара, режимов проветривания и пожарного водоснабжения, устойчивости проветривания при пожаре в вертикальных или наклонных горных выработках, зон поражения при пожарах, взрывах (вспышках), **проводятся с использованием специализированного программного обеспечения на электронно-вычислительных машинах на основе моделей топологии горных выработок.**

Требование инструкции привело к необходимости модернизировать программу «Аэросеть» [2, 3] и разработать новые расчетные и аналитические инструменты.

Расчет пожарного водоснабжения

Расчет производится аналогично решению задачи распределения расходов в вентиляционной сети. Методы основаны на уравнениях Кирхгофа, которые впервые были представлены для расчета электрических цепей [41]. Система уравнений, составленная на основе этих законов для гидравлических сетей выглядит следующим образом:

$$\sum_{i=1}^{N_{E(V)}} Q_i = 0$$

$N_{E(V)}$ – число ветвей, сходящихся к вершине;

Q_i – расход воды в ветви i ;

$$\sum_{i=1}^{N_{E(C)}} H_i = P_i + W_i$$

$N_{E(C)}$ – число ветвей в замкнутом контуре;

H_i – перепад давления в ветви i ;

P_i – напор, создаваемый насосом в ветви i ;

W_i – гидростатическое давление в ветви i .

В отличие от вентиляционных сетей, где вес воздуха не всегда оказывает значительное влияние на проветривание, в расчете гидравлических сетей необходимо учитывать гидростатическое давление:

$$W_i = \rho \cdot g \cdot \Delta z_i$$

ρ – плотность воды;

g – ускорение свободного падения;

Δz_i – разница высотных отметок между начальной и конечной вершиной ветви i .

Перепад давления в ветви рассчитывается по следующей формуле:

$$H_i = R_i \cdot |Q_i| \cdot Q_i$$

R_i – гидравлическое сопротивление ветви i .

Для определения гидравлического сопротивления в программе используется формула из справочника Шевелева Ф.А. [51] для стальных труб:

$$R = \frac{17,02}{d^{5,3}} \cdot L \cdot \left(1 + \frac{K_l}{100}\right)$$

L – длина трубопровода;

d – диаметр трубопровода;

K_l – коэффициент местных гидравлических сопротивлений в процентах от линейного сопротивления.

При скорости воды меньше 1,2 м/с вводится поправка на неквадратичность закона движения:

$$R = \frac{17,02}{d^{5,3}} \cdot L \cdot \left(1 + \frac{K_l}{100}\right) \cdot 0,852 \cdot \left(1 + \frac{0,867}{v}\right)^{0,3}$$

v – скорость течения воды.

Пример алгоритма, реализованного в программе «Аэросеть», показан на рис. 1.

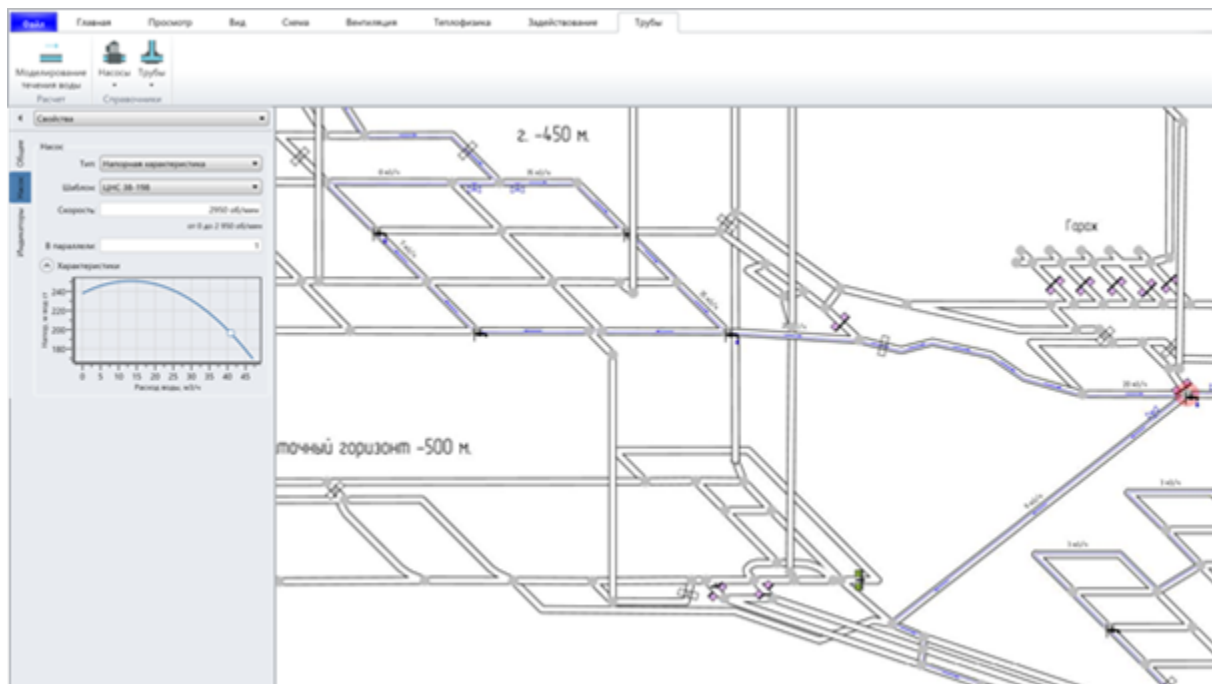


Рис. 1. Расчет распределения воды в трубопроводе

Для проведения расчета сначала на основе модели вентиляционной сети создается топология трубопровода, устанавливаются насосы и задаются их параметры работы, отмечаются потребители воды. После чего программа может смоделировать и отобразить картину распределения воды в трубопроводе. Результаты расчета позволяют проанализировать обеспеченность потребителей водой и разработать мероприятия по улучшению подачи воды.

Разработанный алгоритм можно применять для моделирования любого технического трубопровода, в том числе и пожарного.

Расчет зон поражения при взрывах

Расчет производится на основе высвобождаемой энергии при взрыве. Взрывная волна распространяется по выработкам вентиляционной сети, постепенно угасая по мере отдаления от эпицентра взрыва. Потеря энергии ударной волны происходит при движении по прямым участкам выработок, преодолении местных сопротивлений, таких как повороты, сопряжения горных выработок, а также при преодолении лобовых сопротивлений, таких как перемычки и завалы горной выработки. Описанный принцип распространения показан на рис. 2.

Высвобождаемая при взрыве энергия приводит к росту внутренней энергии, давления и плотности воздуха в месте взрыва. Величина пика давления в эпицентре взрыва определяется на основании уравнения состояния идеального газа при адиабатическом сжатии:

$$p_{max} = \frac{\left(p_0 + (\gamma - 1) \cdot \rho_0 \cdot \frac{E}{S \cdot L} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}}{p_0^{\frac{1}{\gamma-1}}}$$

ρ_0 — начальная плотность воздуха;

p_0 — начальное давление воздуха;

γ — показатель адиабаты для воздуха;

E — количество энергии, высвобождаемое при взрыве;

S — сечение горной выработки.

L — длина выработки.

Следующее значение скачка давления в конце выработки p_{l+1} рассчитывается от значения скачка давления в начале этой выработки p_l согласно следующей зависимости, полученной Чеховских А.М. и включенной в устав военизированной горноспасательной части [6]:

$$p_{l+1} = p_l \cdot e^{\frac{-\alpha \cdot P \cdot L \cdot (4,1 - 3,1 \cdot e^{-0,03 \cdot p_l})}{S}}$$

α — коэффициент аэродинамического сопротивления;

P — периметр выработки.

Расчет потери энергии ударной волны при прохождении завалов, вентиляционных сооружений осуществляется по формуле:

$$p_{l+1} = p_l \cdot e^{-R_a \cdot S^2 \cdot (4,1 - 3,1 \cdot e^{-0,03 \cdot p_l})}$$

R_a — аэродинамическое сопротивление перемычки.

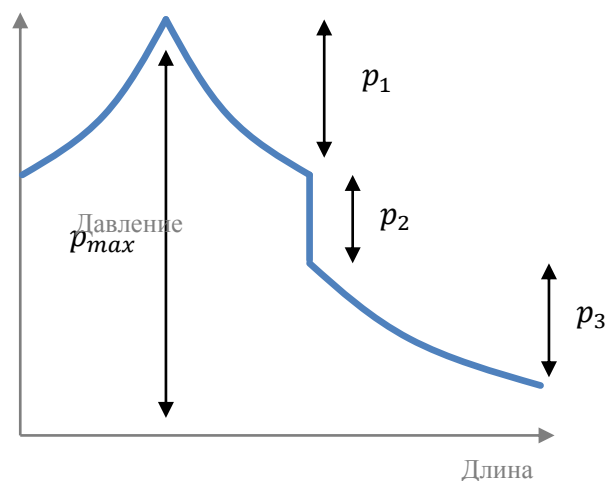


Рис. 2. Принцип распространения взрывной волны модели

Предполагается, что на сопряжениях горных выработок энергия ударной волны распределяется по всем ответвлениям пропорционально их поперечным сечениям. Ударная волна, приходящая из выработки, характеризуемая скачком давления p_{in} , распределяется по остальным выработкам, которые находятся на границе с этим сопряжением, независимо от того, является ли воздушная струя входящей или исходящей из сопряжения. При этом скачок давления, приходящий в каждую выработку, рассчитывается по формуле:

$$p_{out} = p_{in} \cdot \left(\frac{S_{out}}{\sum_{j=out} S_j} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Пример работы реализованного в программе «Аэросеть» расчета зон поражения при взрыве приведен на рис. 3.

По приведенным выше формулам рассчитывается распространение избыточного давления в выработках после взрыва. Небезопасное избыточное давление подсвечивается красным цветом. Безопасным для человека перепадом давления принимается значение 6 кПа [6].

Разработанный алгоритм позволяет оценить, насколько разрушительным будет взрыв в горных выработках и как последствия взрыва повлияют на проветривание рудника.

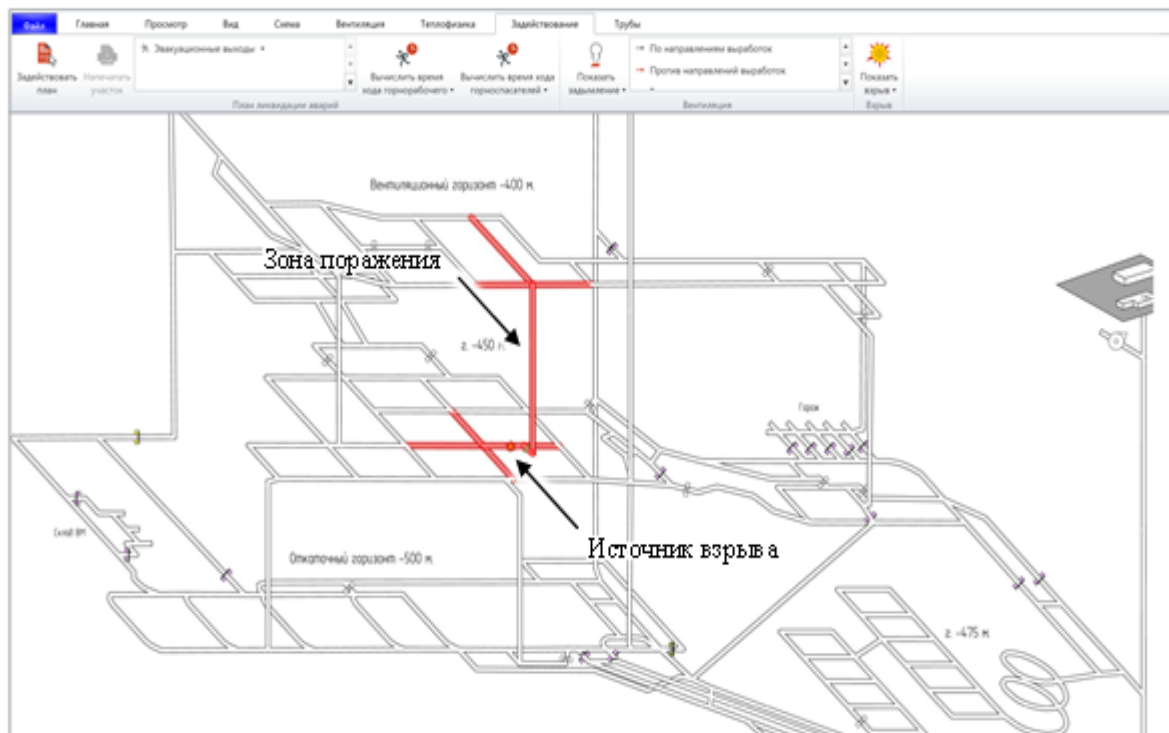


Рис. 3. Расчет зон поражения при взрывах

Расчет зон поражения при пожарах и режимов проветривания при пожарах

Моделирование задымления при пожарах в программе «Аэросеть» активно развивается на протяжении последних 5 лет [8,9]. К моменту вступления требований в силу программа позволяла сохранять различные вентиляционные режимы, на основе которых прогнозируются зоны задымления.

Основной целью анализа режимов проветривания при пожарах является определение путей движения в зонах поражения. В связи с этим в программу добавлены аналитические инструменты, позволяющие рассчитывать маршруты в задымленной атмосфере.

Скорость передвижения и необходимый запас кислорода горноспасательных отделений в загазованных горных выработках определяется согласно «Инструкции по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» [1].

Расчет времени выхода людей в изолирующих самоспасателях на свежую струю воздуха из угрожаемых участков шахты производится согласно «Методическим рекомендациям о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях» [10, 11]

Программная реализация данных аналитических инструментов приведена на рис. 4.

Для расчета времени движения достаточно выбрать место возникновения пожара, режим проветривания, указать начальную и конечную точку маршрута. Программа автоматически определит зону задымления, проложит маршрут и рассчитает расстояние и время по выбранной методике.

Разработанные инструменты для поиска пути и расчета времени движения в задымленной атмосфере позволили значительно ускорить разработку мероприятий планов ликвидации аварий на горных предприятиях.

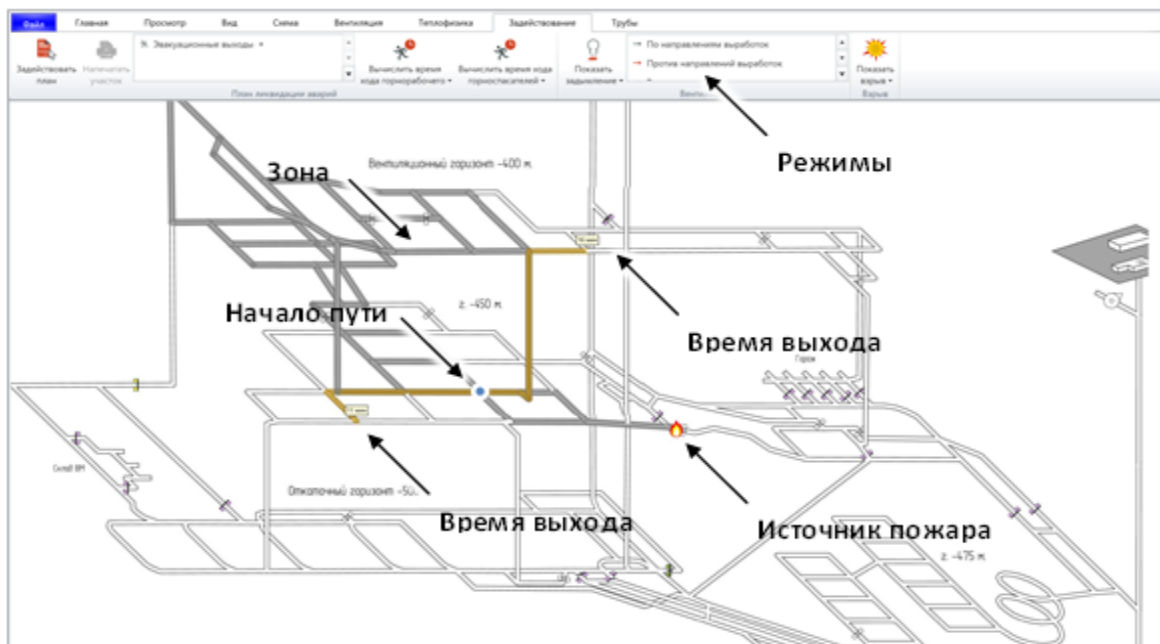


Рис. 4. Расчет времени выхода с места аварии

Расчет устойчивости проветривания при пожаре в вертикальных или наклонных горных выработках

В настоящее время программа позволяет моделировать влияние пожара на проветривание рудника, но для этого используются сложные модели, учитывающие множество факторов [12]. Пример окна для настройки теплофизической модели приведен на рис. 5. Такие модели требуют внесения большого количества исходных данных и детальной настройки параметров расчета.

Дальнейшую модернизацию программы планируется в направлении упрощения расчета устойчивости проветривания при пожаре в вертикальных или наклонных горных выработках.

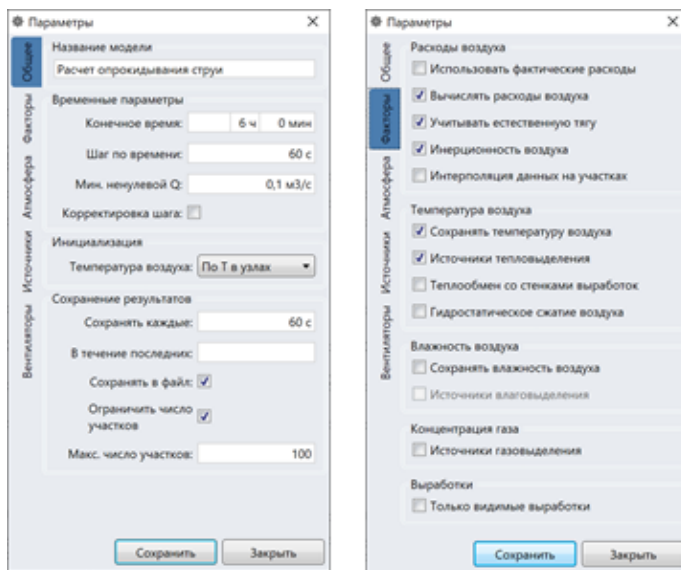


Рис. 5. Окно ввода параметров теплофизической модели

Заключение

Разработанные расчетные и аналитические инструменты апробированы при выполнении научно-исследовательских работ по расчету-обоснованию вариантов проветривания и кондиционирования воздуха при строительстве и эксплуатации залежей С-3, С-4 рудника «Таймырский», а также при вскрытии, подготовке и отработке залежи С-2 рудника «Таймырский».

На сегодняшний день программа «Аэросеть» удовлетворяет всем требованиям пункта 26 «Инструкции по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» и позволяет проводить все необходимые расчеты.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы»: утв. 31.10.2016, № 449. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2018. – 68 с. – (Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности: сер. 06, вып. 9).
2. Аэросеть – Решение проблем рудничной вентиляции [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://aeroset.net>. – (дата обращения: 25.08.2019).
3. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опублик. 20.02.2015. – 1 с.
4. Kirchhoff G. Ueber die Auflösung der Gleichungen, auf welche man bei Untersuchung der linearen Vertheilung, galvanische Ströme geführt wird // Annalen der Physik und Chemie. – 1847. – V. 148, № 12. – P. 497-508. DOI: 10.1002/andp.18471481202.
5. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: справ. пособие. – 6-е изд., доп. и перераб. – М.: Стройиздат, 1984. – 117 с.
6. Устав ВГСЧ по организации и ведению горноспасательных работ: утв. 09.06.2017, № 251. Зарегистрировано Минюстом России 24.08.2017 г. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/456074968>. (Дата обращения: 15.04.2019).
7. Лукашов О.Ю. Исследование волновых эффектов, возникающих при распространении ударных волн по разветвленной сети горных выработок: дис. ... канд. физ.-мат. наук; 01.02.05 / Лукашов Олег Юрьевич. – Томск, 2003. – 141 с.
8. Гришин Е.Л., Кормщиков Д.С., Левин Л.Ю. Использование результатов теплогазодинамического расчета при анализе аварийных ситуаций и разработке плана ликвидации аварий в аналитическом комплексе «АэроСеть» // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2014. – № 9. – С. 185-189.
9. Кормщиков Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Кормщиков Денис Сергеевич. – Пермь, 2015. – 121 с.
10. Методические рекомендации о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях: РД 15-11-2007: утв. 24.05.2007, № 364. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 68 с. – (Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности: сер. 06, вып. 6).
11. Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2013. – № 12. – С. 179-184.
12. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2014. – № 2. – С. 154-161.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2019.4.25

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ В СИСТЕМАХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ

А.Г. ИСАЕВИЧ, С.В. МАЛЬЦЕВ

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе представлены результаты исследований системы вентиляции гипсовой шахты, характеризующейся наличием выработок большого сечения (от 40 до 130 м²). Рассмотрены вопросы возможности проветривания тупиковых камер сечением 130 м² за счет диффузионного перемешивания, без применения вентиляторов местного проветривания. Установлены оптимальные места размещения источников тяги для интенсификации проветривания.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, гипсовая шахта, выработки большого сечения, эжекторные установки, численное моделирование, вычислительная динамика жидкости и газа, двигатели внутреннего сгорания.

Предприятие ООО «Кнауф Гипс Новомосковский» разрабатывает Новомосковское месторождение гипсового камня в Тульской области с 1949 г. Гипсовый камень под Но-