

12. Иванов Л.А., Туманов В.В., Савченко А.В. Структурно-геодинамические предпосылки использования микросейсм для поиска аномальных скоплений метана // Труды РАНИМИ. – 2022. – № 16-17 (31-32). – С. 46-59.
13. Комплект карт метаморфизма углей Донецкого бассейна / Левенштейн М.Л., Спирина О.И.; ПГО «Донбасгеология». ГлавКГУ «Укргеология». – Киев, ЦТЭ, 1991. – 104 с.
14. Коваленко К.В., Лазуткина Н.Е., Пономаренко О.М., Зарипова Л.Ф. Определение проницаемости по данным геофизических исследований скважин на основе петрофизического инварианта // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2022. – Вып. 2 (37). – С. 17-26. – DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2022-37.art2.
15. Иванов Л.А., Воевода Б.И. Современная глубина как фактор изменения скорости распространения упругих продольных волн V_p угленосных пород Донбасса // Наукові праці ДонНТУ: серія гірничо-геологічна. – 2003. – Вип. 63. – С. 127-133.
16. Патрикеев В.Н., Ломтев В.Л. Разломы Северного Сахалина: особенности строения и сейсмическая опасность // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2016. – № 3. – С. 44-58.
17. Ломтев В.Л., Патрикеев В.Н. Сейсмические признаки активных разломов Северного Сахалина // Геосистемы переходных зон. – 2017. – № 1. – С. 37-48.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.3.18

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИНТЕНСИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫДЕЛЕНИЯ В НАКЛОННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

М.Д. Попов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Данная статья посвящена анализу методов и подходов к моделированию интенсивных источников теплотыделения в наклонных горных выработках в программном комплексе Ansys. В статье рассмотрены основные этапы разработки математической модели от построения начальной геометрии до задания граничных условий и выбора требуемых моделей. Также в статье описаны основные недостатки и преимущества отдельных расчетных пакетов в привязке к решаемой задаче.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, устойчивость проветривания, подземный пожар, аварийная ситуация, моделирование.

Введение

В настоящий момент требованием пункта двадцать шесть Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы» [5] устанавливается необходимость производства инженерных расчетов параметров развития пожара, а также определение устойчивости проветривания в вертикальных и наклонных горных выработках при пожаре. При этом данные расчеты целесообразны для выработок с нисходящим проветриванием. Возможная неустойчивость проветривания в таких выработках обусловлена наличием тепловых депрессий, возникающих вследствие интенсивного нагрева воздуха, проходящего по горной выработке. Опасность неустойчивого проветривания в данном случае заключается в изменении направления движения воздушного потока и, как следствие, изменение мероприятий, необходимых для локализации и ликвидации аварии, а также изменение направления движения горнорабочих и горноспасателей в момент аварийной ситуации [7].

При этом на данный момент набор инструментов, позволяющих оценить устойчивость проветривания наклонной выработки в аварийной ситуации в современных программах, предназначенных для расчета рудничной вентиляции, достаточно ограничен.

Наряду с этим использование этих инструментов сопряжено с трудоемкостью в сборе исходных данных и требует разработки детализированных моделей вентиляционных сетей [8, 9]. В связи с этим возникает необходимость получения математических зависимостей между основными параметрами горной выработки и источника пожара, которые позволят производить инженерные расчеты по определению критерия устойчивости проветривания выработки в аварийной ситуации [18, 19]. В случае наличия интенсивного источника нагрева в наклонной горной выработке с нисходящим движением воздушного потока можно выделить следующие параметры, определяющие устойчивость проветривания [6].

- Геометрические характеристики наклонной горной выработки: длина, форма сечения и его площадь, периметр, угол наклона.
- Характеристики вентиляционной сети: начальный расход воздуха, влияние вентилятора главного проветривания, остаточная депрессия ГВУ в заданной точке.
- Характеристики источника тепловыделения: размер источника, его местоположение по длине горной выработки, количества тепла, выделяющегося в единицу времени.
- Теплофизические свойства массива, определяющие интенсивность теплообмена воздуха и породного массива.

Одним из способов анализа устойчивости проветривания в зависимости от параметров источника пожара и параметров рассматриваемой горной выработки является численное многопараметрическое моделирование физических процессов в аварийной горной выработке. Для применения этого способа предлагается использовать современный программный пакет ANSYS и с помощью численного моделирования провести качественный анализ воздухораспределения в наклонной выработке при возвратных и частично-возвратных течениях, вызванных тепловой депрессией.

Построение геометрии

Разработка любой модели в программном продукте ANSYS состоит из четырех основных этапов. Построение геометрии, создание расчетной сетки, задание свойств модели включают в себя задание граничных условий, выбора среды, а также мат аппарата и математических моделей, которые будут применены для решения задачи. Последний этап – это анализ и выгрузка полученных результатов моделирования.

В качестве программного продукта для создания расчетной геометрии для расчетов гидродинамики в ANSYS встроены пакеты SpaceClaim, Discovery и DesignModeler. Несмотря на то, что все эти модули подходят для решения одной и той же задачи (построение геометрии), они отличаются подходом к формированию данной геометрии. Основным их отличием является поддержка возможности параметрического задания свойств элементов геометрии. Данную функцию поддерживает только DesignModeler, учитывая специфику решаемой задачи, которая подразумевает возможность изменения геометрических особенностей наклонной выработки, а также размеров и местоположения источника тепловыделения, в качестве инструмента был выбран DesignModeler. Для дальнейшего удобства работы с сеточным редактором представленная геометрия была разбита на 43 взаимосвязанных тела, с помощью которых в дальнейшем формируется величина пограничного расчетного слоя и свободной поверхности течения жидкости. В общем виде геометрия представляет собой горизонтальный участок горной выработки прямоугольного сечения с Т-образным перекрестком, который является началом наклонного участка горной выработки. Пример расчетной геометрии приведен на рисунке 1.

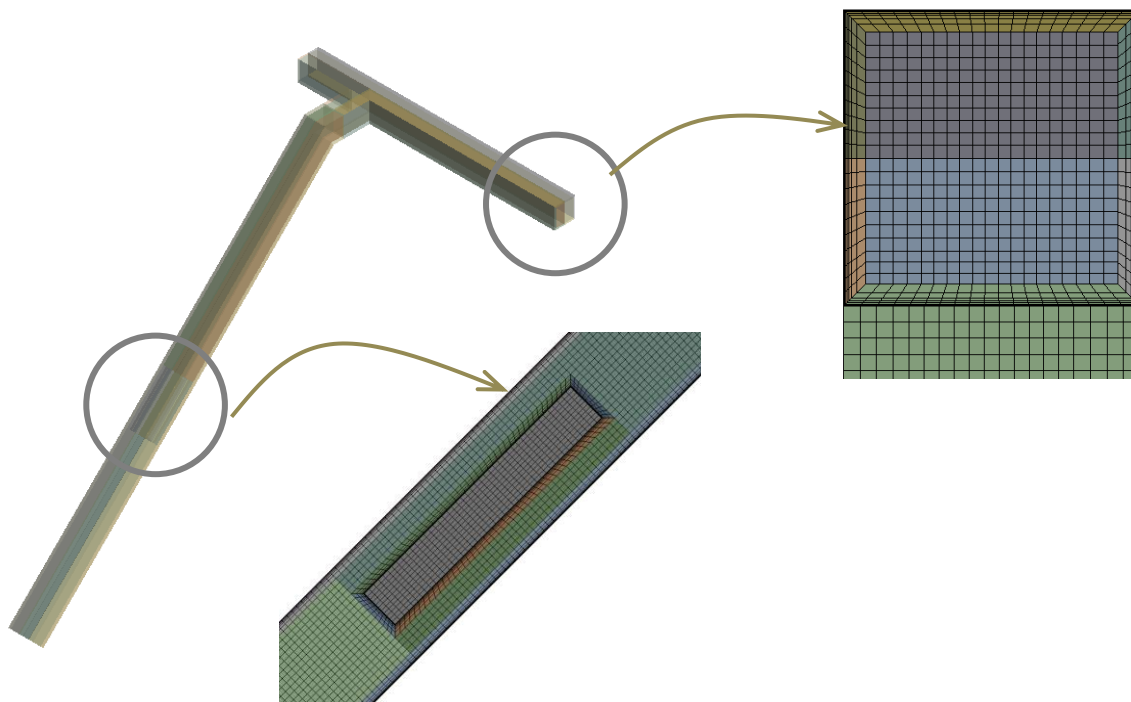


Рис. 1. Общий вид расчетной геометрии и пример построения сеточной модели

На следующем этапе для готовой геометрии строилась сетка. При выборе типов элементов сетки определяющим фактором стало время расчета. Конечная сетка является структурированной и состоит только из гексаэдральных элементов, расположенных в систематических, упорядоченных рядах и столбцах, образующих регулярную геометрическую структуру. Основным ее преимуществом является то, что при одинаковой вычислительной мощности сеточная сходимость достигается при меньшем количестве элементов. Таким образом, средняя продолжительность одного расчета шестидесяти секунд модельного времени занимает четыре с половиной часа. В то время как то же решение, выполненное на неструктурированной сетке, занимает порядка суток.

На рисунке представлен общий вид отдельных элементов полученной сетки, размер наибольшего элемента составил 24 сантиметра, толщина пограничного слоя была принята 40 см, что соответствовало 16 пограничным слоям, с толщиной первого слоя 1 мм. Данные параметры были выбраны для достижения величины y^+ менее 1 (y^+ – безразмерный коэффициент, который используется в вычислительной гидродинамике (CFD) для описания качества пограничного слоя для принятой модели турбулентности).

При этом величина y^+ определена как

$$y^+ = \frac{\rho * u_\tau * y}{\mu} \quad (1)$$

ρ – плотность среды, u_τ – касательное напряжение на стенке, y – физическое расстояние от стенки, μ – динамическая вязкость среды.

Численное моделирование осуществлялось в программных модулях CFX и Fluent. Задача решалась методом контрольных объемов, с помощью которого осуществляется дискретизация усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, в частности, уравнение сохранения массы, импульса и энергии. При учете турбулентности потока используется

модель SST k-omega. Модель SST k-omega применяется для учета влияния турбулентных вихрей на поток, а также для расчетов граничных слоев, где поток сильно зависит от турбулентности. И так как в рамках данного анализа была потребность учета эффекта тепловой депрессии, в решаемую систему уравнений было включено условие переменности плотности потока воздуха согласно уравнению совершенного газа.

Ниже представлена трехмерная модель нестационарного течения сжимаемого воздушного потока, основу которой составляют уравнения неразрывности, сохранения количества движения (уравнение Навье-Стокса) и сохранения энергии [1, 2]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \nabla(\mu(\nabla u + (\nabla u)^T)) + g\rho \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h u) = -\nabla(\lambda \nabla T) + \nabla(\mu_t \rho C_p \nabla T) + Q \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, u – вектор скорости потока, t – время, p – давление, μ – динамическая вязкость воздуха, g – ускорение свободного падения.

Уравнения (1)-(3) дополнялись выражением для турбулентной вязкости и уравнениями сохранения турбулентных характеристик потока. Используемая двухпараметрическая модель турбулентности SST k-omega [3, 4], базируется на двух уравнениях – уравнении для кинетической турбулентной энергии (k) и уравнении для удельной диссипации кинетической турбулентной энергии (ω).

Граничные условия на входе в расчетную модель заданы массовым расходом, который варьировался в диапазоне от 50 до 400 кг/с. Граничное условие на выходе из сквозной выработки задано как нулевое статическое давление. Окончание наклонного участка выработки задано граничным условием типа opening подразумевающим возможность движения потока воздуха как из расчетной области, так и в нее. В модели учитывается теплообмен со стенкой с фиксированной температурой, которая варьировалась в диапазоне от 20 до 50°C. Источник тепловыделения задан тепловым потоком на 1 м² площади поверхности и варьировался от 20 до 500 кВт/м², что соответствует суммарному тепловыделению в пике, равному 20 МВт. При этом мощность тепловыделения 20 МВт соответствует пиковому тепловыделению процесса горения шахтной погрузочно-доставочной машины [12-17].

Расчет производился в двух программных пакетах – CFX и Fluent. Для первых выполненных расчетов было произведено сравнение полей скоростей (рисунок 2б) в различных сечениях наклонного участка, а также сравнение полей температур (рисунок 2а). На рисунке 2б красным представлены результаты расчетов в пакете Fluent, а зеленым – в CFX. Из сравнения кривых следует, что поля температур для двух решений практически идентичны, а поля скоростей расходятся незначительно. При этом расхождение в расходе на поверхности входа в наклонную выработку составляло не более 2%. И так как на данный момент Fluent является развивающимся продуктом, в который включены дополнительные надстройки, позволяющие более точно моделировать зоны образования вихрей и больших градиентов скорости, для дальнейшей работы было принято решение остановиться только на вычислениях в Fluent.

Проведен анализ эпюр скорости в срединном сечении наклонной выработки с шагом в 1 метр. Графическое представление было выполнено как с использованием контурных поверхностей, так и посредством вывода поперечных профилей исследуемых параметров – температуры воздуха и компоненты скорости воздуха вдоль оси выработки. Пример представления результатов расчета можно увидеть на рисунке 3.

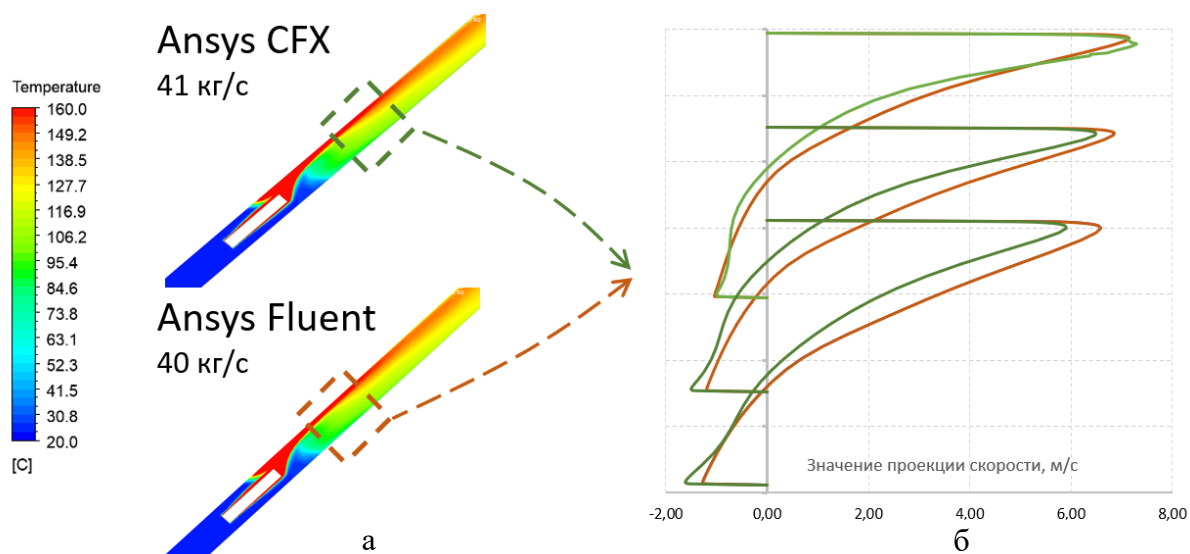


Рис. 2. Сравнение результатов расчета полей скоростей и температур в различных сечениях наклонной выработки в программных пакетах CFX и Fluent

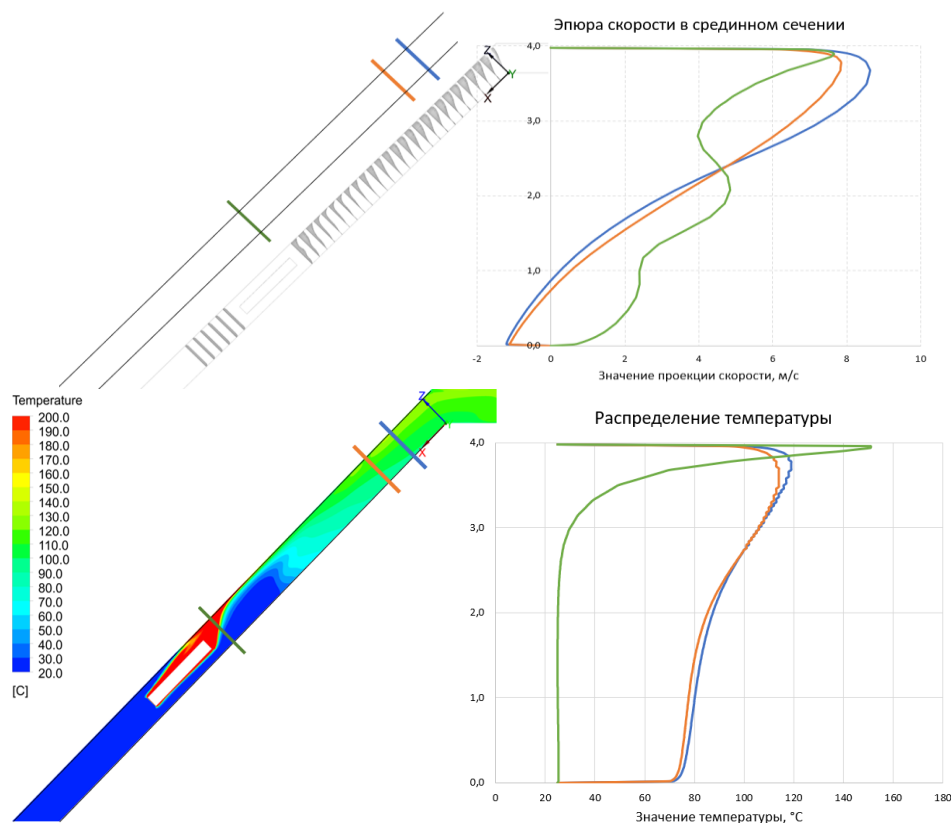


Рис. 3. Представление результатов расчета эпюр скорости в сечениях наклонной выработки и полей распределения температуры

Полученные эпюры скорости позволяют определить размер вихревой структуры в зоне расположения интенсивного источника тепловыделения, а также размер зоны возвратных течений воздуха из-за эффекта плавучести. Из рисунков видно, что в зоне выравнивания поля скорости на удалении от источника происходит аналогичное выравнивание полей температуры, что позволяет сделать вывод об окончании зоны возвратного течения.

Выводы

Таким образом на текущем этапе получен массив данных результатов моделирования, который позволит определить закономерности влияния различных параметров на устойчивость проветривания наклонных выработок при наличии интенсивных источников нагрева. Также по результатам анализа инструментов построения геометрий пакета ANSYS сделан вывод о том, что для решения многопараметрических задач с переменной топологией лучшим решением является выбор редактора геометрий DesignModeler. При этом для задания физики процесса и выбора граничных условий как наиболее подходящий был выбран пакет Fluent ввиду удобства и разнообразия опций решателя. При этом для тестовых вариантов моделирования возгорания в наклонной выработке результаты расчета в пакетах ANSYS Fluent и CFX практически одинаковы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР № 122012000396-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колмычков В.В., Мажорова О.С., Попов Ю.П. Анализ алгоритмов решения трехмерных уравнений Навье-Стокса в естественных переменных // Дифференциальные уравнения. – 2006. – Т. 42. – №. 7. – С. 932-942.
2. Gresho P.M., Sani R.L. On pressure boundary conditions for the incompressible Navier-Stokes equations // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 1987. – V. 7. – №. 10. – P. 1111-1145.
3. Fletcher C., Computational Techniques for Fluid Dynamics: Fundamental and general techniques. – 2nd ed. – Berlin: Springer-Verlag, 1988. – 401 p.
4. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд., исправ. и доп. – М.:Физматгиз, 1962. – 349 с.: ил.
5. 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. 11.12.2020, № 520. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573140267>.
6. Гришин Е.Л. Научное обоснование способов повышения надежности вентиляционных сетей подземных рудников: дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Гришин Евгений Леонидович. – Пермь, 2013. – 133 с.
7. 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» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 185-189.
8. Попов М.Д., Кормщиков Д.С., Семин М.А., Левин Л.Ю. Расчет устойчивости воздушных потоков в горных выработках по фактору тепловой депрессии в аналитическом комплексе «Аэросеть» // Безопасность труда в промышленности. – 2020. – № 10. – С. 24-32. – DOI: 10.24000/0409-2961-2020-10-24-32.
9. 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.
10. Semin M.A., Levin L.Y. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection. – 2019. – V. 124, Part B. – P. 167-171. – DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
11. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. – М.: Акад. ГПС МЧС России, 2005 г. – 336 с.: ил., табл.
12. Paveley, 2010. Reference design. Section 24– Fire and Life Safety. Engineering Brief. Sydney Metro.
13. Brake, D.J. Fire Modelling in Underground Mines using Ventsim Visual VentFIRE Software // The Australian Mine Ventilation conference: Proceedings. – Adelaide, 2013. – P. 265-276.
14. Lönnermark A, Claesson A, Lindström J, Li Y.Z, Kumm M., Ingason H. Full-scale fire tests with a commuter train in a tunnel: SP Report / SP Technical Research Institute of Sweden. – 2012. – 15 p.
15. Safaro E., Bertola V. Fires in tunnels: Experiments and modelling // The Open Thermodynamics Journal. – 2010. – V. 4, №. 1. – DOI: 10.2174/1874396X01004010156.

16. Okamoto K., Watanabe N., Hagimoto Y., Chigira T., Masano R., Miura H., Ochiai S., Satoh H., Tamura Y., Hayano K., Maeda Y., Suzuki J. Burning behaviour of sedan passenger cars // Fire Safety Journal. – 2009. – V. 44, №. 3. – P. 301-310.
17. Ingason H., Lönnemark A. Heat release rates from heavy goods vehicle trailer fires in tunnels // Fire Safety Journal. – 2005. – V. 40, №. 7. – P. 646-668. – DOI: 10.1016/j.firesaf.2005.06.002.
18. Василенко В.И. Принципы, критерии, алгоритмы управления проветриванием и устойчивость вентиляционных струй при авариях в шахте // Изв. вузов. Горн. журн. – 2010. – №. 8. – С. 42-46.
19. Костеренко В.Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети горных выработок угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2011. – №. 6. – С. 373-377.
20. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М.: Недра, 1966. – 249 с.
21. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания вентиляционных сетей // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 10 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2012. – С. 255-257.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.3.19

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ СИСТЕМ ДИНАМИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ РУДНИКОВ СЛОЖНОЙ ТОПОЛОГИИ

М.А. Семин

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрена задача об определении мест размещения отрицательных регуляторов (автоматических вентиляционных дверей) при разворачивании систем автоматизированного управления проветриванием на примере медно-никелевого рудника. Предложена методика анализа взаимного влияния множества автоматических вентиляционных дверей на воздухораспределение в руднике, обеспеченность потребителей свежим воздухом в различные смены.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, динамическое управление проветриванием, автоматическая вентиляционная дверь, вентиляционная сеть, сложная топология.

Введение

Перспективным и популярным подходом к повышению энергоэффективности систем вентиляции подземных рудников в последние десятилетия является динамическое управление проветриванием [1]. За рубежом данный подход известен как вентиляция по требованию (Ventilation on demand) [2, 3]. Суть данного подхода заключается в том, чтобы подавать свежий воздух преимущественно в те рабочие зоны, в которых ведутся горные работы, при этом в оставшейся части рудника расходы воздуха должны быть минимизированы [4]. Экономический эффект от реализации такого подхода достигается за счет существенной разницы в требуемых расходах воздуха для проветривания рабочих зон рудник в различные смены. Вместо того, чтобы поддерживать на руднике стационарный режим проветривания из расчета на самую неблагоприятную смену, динамическое управление проветриванием позволяет снижать или увеличивать расход воздуха при переходе от одной смены к другой.

Вентиляция по требованию, получившая широкое распространение за рубежом, является аналогом систем автоматизированного управления проветриванием (САУП), теоретические основы которых были сформулированы в СССР еще в 70-е годы прошлого века [5]. В [4] указывается, что САУП является несколько более широким поня-