

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колесов Е.В. Обоснование последовательного проветривания рабочих зон нескольких тупиковых выработок // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 291-295. DOI: 10.7242/gdsp.2018.16.78
2. Колесов Е.В. Разработка методики расчета количества воздуха, требуемого для проветривания тупиковых проходческих выработок после взрывных работ // Горное эхо. – 2019. – № 3 (76). – С. 80-84. DOI: 10.7242/echo.2019.3.22.
3. Ушаков К.З. Газовая динамика шахт. – М.: Изд-во МГГУ, 2004. – 480 с.: ил.
4. Колесов Е.В., Шалимов А.В., Семин М.А. Разработка мероприятий по отводу взрывоопасных газов из выработанного пространства при затоплении калийного рудника // Безопасность труда в промышленности. – 2019. – № 12. – С. 60-65. DOI: 10.24000/0409-2961-12-60-65.
5. Воронин В.Н. Основы рудничной аэро-газодинамики. – М.; Л.: Углетехиздат, 1951. – 492 с.: ил.
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 // Горн. журн. – 2015. – № 1. – С. 72-75. DOI: 10.17580/gzh.2015.01.13.
7. Tariq F., Bekir G. Evaluation of line brattice length in an empty heading to improve air flow rate at the face using CFD // International Journal of Mining Science and Technology. – 2017. – V. 27, № 2. – P. 253-259. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.01.012
8. Torno S., Torano J., Ulecia M., Allende C. Conventional and numerical models of blasting gas behaviour in auxiliary ventilation of mining headings // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2013. – V. 34. – P. 73-81. DOI: 10.1016/j.tust.2012.11.003
9. Xu G., Luxbacher K.D., Ragab S., Xu J., Ding X. Computational fluid dynamics applied to mining engineering: a review // International Journal of Mining, Reclamation and Environment. – 2016. – V. 31. – № 4. – P. 1-25. DOI: 10.1080/17480930.2016.1138570.
10. Флегчер К. Основные положения и общие методы. Т. 1: Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 502 с.: ил. – (Вычислительные методы в динамике жидкостей: В 2 т.)
11. Bardina, J.E., Huang, P.G., Coakley, T.J. Turbulence Modeling Validation, Testing, and Development. – NASA Technical Memorandum, 1997. – 110446.
12. Jones, W.P., Launder, B.E. The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 1972. – V. 15. – P. 301-314.
13. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. – Second edition. – Anaheim: DCW Industries, 1998. – 174 p.
14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник. – 7-е изд., испр. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.: ил.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2020.1.18

**РАСЧЕТ ОПРОКИДЫВАНИЯ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ
В ВЕРТИКАЛЬНЫХ И НАКЛОННЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ
ПРИ ПОЖАРЕ ПО ФАКТОРУ ТЕПЛОВОЙ ДЕПРЕССИИ
В АНАЛИТИЧЕСКОМ КОМПЛЕКСЕ «АЭРОСЕТЬ»**

М.Д. Попов¹, Д.С. Кормщиков²

¹ООО «Научно-производственное объединение «АэроСфера»

²Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В данной статье приводится описание алгоритма расчета устойчивости при пожаре с учетом тепловой депрессии, применяемого в качестве расчетного модуля в аналитическом комплексе «Аэросеть». Рассмотрены основные особенности алгоритма и инструменты для графического анализа результатов вычисления естественной тяги, вызванной действием пожара на вентиляционную сеть.

Ключевые слова: шахтная вентиляция, горная выработка, подземный пожар, тепловая депрессия, естественная тяга, устойчивость проветривания, расчет воздухораспределения, вентиляционная сеть.

Введение

Тенденция развития горнодобывающей отрасли в последние десятилетия характеризуется увеличением мощности добычи полезных ископаемых. При этом

запасы легкодоступных ресурсов на сравнительно малой глубине истощаются и это в свою очередь приводит к увеличению глубины ведения горных работ и величины шахтных полей. [1, 2]. Вентиляционные сети в данных условиях становятся более разветвленными и протяженными, с постоянно изменяющейся топологией.

Вместе с тем значительно участились случаи возникновения пожаров. Возникновение пожаров обусловлено применением высокопроизводительной техникой и большой протяженностью сетей электроснабжения. В этих условиях анализ вентиляционных сетей становится неотъемлемой и обязательной частью при составлении плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий [3, 4]. Этот факт подтверждается изменениями, внесенными в пункт 26 Федеральных норм и правил «Инструкция по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, на которых ведутся горные работы». В данном пункте Федеральных норм и правил приведен перечень обязательных к проведению расчетов при составлении оперативной части плана по локализации и ликвидации последствий аварий. Один из обязательных расчетов при анализе аварийных ситуации является расчет устойчивости проветривания при пожаре в вертикальных или наклонных горных выработках, а также зон поражения при пожарах. В результате возникновения пожара возможно изменение режима проветривания части вентиляционной сети или создание неустойчивого режима движения воздуха в отдельных выработках. Это может привести к загазированию продуктами горения рабочих участков и затруднить выход людей при пожаре, что делает анализ аварийных ситуаций актуальным вопросом.

Последние годы для проведения расчетов аварийных режимов проветривания все более широкое применение находят отечественные и зарубежные программные комплексы, к наиболее известным из которых относятся «АэроСеть», «Вентиляция 2.0» и «VentSim». В данной статье представлены основные функциональные возможности программы Аналитический комплекс «Аэросеть», которая обладает удобным графическим интерфейсом позволяющим быстро оценить зону влияния пожара и соответственно тепловой депрессии на воздухораспределение в сети горных выработок.

Расчет устойчивости воздухораспределения при пожаре фиксированной тепловой мощности

Анализ устойчивости проветривания горных выработок в программе «Аэросеть» производится посредством расчета изменений расходов воздуха при появлении тепловой депрессии в различных горных выработках. Дальше рассуждение об устойчивости будут проводиться в терминах изменений расходов воздуха.

Предполагается, что пожар может произойти в любой выработке рудничной вентиляционной сети. Изменение расходов воздуха в результате действия тепловой депрессии, вызванной пожаром, также имеет место для всех выработок вентиляционной сети и условно можно назвать зоной влияния пожара.

Изменение расхода воздуха в каждой отдельно взятой горной выработке вентиляционной сети, вызванное тепловой депрессией, зависит от величины тепловой мощности пожара, и выработки, где произошел пожар.

Для того, чтобы определить наибольшее изменение расхода воздуха, вызванное тепловой депрессией, в общем случае необходимо поставить источник тепловыделений от пожара в каждую выработку и произвести стационарный расчет аэро- и термодинамических параметров в рудничной вентиляционной сети N раз (где N — количество выработок) решив систему уравнений (1) – (6) [13].

$$\sum_{i \in A_j} Q_i I_{ij} = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{i \in C_k} (R_i Q_i |Q_i| - H_i - \rho_i(T_i) g \Delta h_i) = 0, \quad (2)$$

$$\Delta T_i = T_i^{(in)} + (T_w - T_i^{(in)}) \cdot (1 - A_i). \quad (3)$$

Здесь индексы i, j и k нумеруют ребра, вершины и независимые контуры графа соответственно; I — матрица инцидентности графа; Δh_i — перепад высот (по вертикальной координате z) ребра графа, м; $T_i^{(in)}$ — температура воздуха на входе в ребре (выработку) № i ; T_w — температура стенки выработки № i , °C; безразмерный параметр A_i определяется по формуле:

$$A_i = \exp\left(-\frac{\alpha_i P_i L_i}{\rho_i c_i Q_i}\right). \quad (4)$$

В (2)—(3) предполагается, что ребра ориентированного графа сонаправлены с расходами воздуха в этих ребрах. Также предполагается, что средняя плотность воздуха в выработке зависит от средней температуры воздуха в этой выработке:

$$\rho_i(T_i) = \frac{p_i}{RT_i}. \quad (5)$$

Здесь p_i — среднее абсолютное давление в выработке, Па; R — удельная газовая постоянная, Дж/(кг·°C).

В случае наличия тепловыделений от пожара в горной выработке, прирост температуры в ней будет рассчитываться по формуле:

$$\Delta T_i = T_i^{(in)} + \frac{W}{\rho_i c_i Q_i} + \left(T_w - T_i^{(in)} - \frac{W}{\rho_i c_i Q_i}\right) \cdot A_i. \quad (6)$$

При выводе формулы (6) предполагалось, что источник тепловыделений находится в начале выработки по ходу движения воздуха. Этот случай соответствует максимальной средней температуре воздуха в выработке и поэтому является наиболее пессимистичным случаем в аспекте проводимых расчетов.

Помимо этих расчетов, производится однократный расчет аэро- и термодинамических параметров в случае отсутствия пожаров, результаты которого будут сравниваться с результатами N расчетов с пожарами. В результате будет получена матрица теплового влияния:

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} \Delta Q_1(W_1) & \cdots & \Delta Q_N(W_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta Q_1(W_N) & \cdots & \Delta Q_N(W_N) \end{pmatrix}, \quad (7)$$

элементами которой являются изменения расходов воздуха в каждой $i^{\text{ой}}$ выработке при появлении пожара в каждой $j^{\text{ой}}$ выработке. Матрица \mathbf{H} имеет размерность $N \times N$ и требует проведения $N+1$ расчетов стационарного распределения аэро- и термодинамических параметров в рудничной вентиляционной сети.

Если теперь в каждом столбце матрицы \mathbf{H} найти максимальное по модулю значение изменения расхода воздуха и занести полученные N значений в отдельный вектор, получим вектор \mathbf{h} максимальных изменений расходов воздуха вследствие тепловой депрессии при пожаре заданной интенсивности:

$$\mathbf{h} = \left\{ \max_{1, \dots, N} |\Delta Q_1(W_i)|, \dots, \max_{1, \dots, N} |\Delta Q_N(W_i)| \right\}. \quad (8)$$

Помимо абсолютных значений изменений расходов воздуха представляет интерес изучение относительных значений изменений расходов воздуха, а именно — вектора \mathbf{h}_r :

$$h_r = 100\% \cdot \left\{ \frac{\max_{1, \dots, N} |\Delta Q_1(W_i)|}{Q_1}, \dots, \frac{\max_{1, \dots, N} |\Delta Q_N(W_i)|}{Q_N} \right\}. \quad (9)$$

Компоненты вектора h_r — относительные изменения расходов воздуха во всех выработках вентиляционной сети, выраженные в процентах от начального значения расходов воздуха в соответствующих выработках до возникновения пожара.

Задавшись определенными предельными значениями относительного изменения расхода воздуха в выработке, можно разделить всё множество N выработок на выработки, устойчивые по отношению к пожарам заданной мощности, и выработки, неустойчивые по отношению к пожарам такой мощности. В качестве такого предельного значения может быть, к примеру, взята величина 50 % – на основании [14].

Описанный выше алгоритм может оказаться неэффективным в случае, если количество выработок вентиляционной сети оказывается большим (1000 и более), поскольку при этом пропорционально возрастают затраты на численный расчет матрицы H . Для снижения вычислительной мощности, затрачиваемой на расчет матрицы H , необходимо уменьшить количество выработок, в которые помещается источник тепловыделений от пожара до некоторого значения $M < N$, приемлемого с точки зрения общего времени, затрачиваемого на численный расчет. Это может быть сделано исходя из нескольких соображений:

В вентиляционной сети рудника есть горизонтальные горные выработки, расходы воздуха в которых являются зависимыми друг от друга. Например, две последовательные горные выработки или ребра графа, которые имеют общую вершину, не являющуюся инцидентной по отношению ко всем другим выработкам. Исключение таких выработок из расчета может быть произведено алгоритмически посредством последовательно перебора ребер графа вдоль по потоку.

Из расчета может быть исключен ряд выработок, пожар в которых маловероятен или невозможен по причине отсутствия объектов возгорания: оборудования, горючих материалов и пр.

Может рассматриваться задача о исследовании аэродинамического влияния возгорания на конкретном участке или горизонте рудника.

Для уменьшения вычислительной мощности, затрачиваемой на расчет матрицы H , целесообразным будет перед проведением расчета выделить область рудничной вентиляционной сети и исследовать последствия возникновения пожара только в этой области. Выбирать такую область следует в соответствии с пунктами 2 и 3 выше, или другими аналогичными соображениями.

Численное моделирование и инструменты анализа

Решение задачи (1) – (9) распределения воздуха с учетом тепловой депрессии пожара реализовано в программном модуле аналитического комплекса «АэроСеть», разрабатываемого сотрудниками «Горного института УрО РАН».

Первоочередная цель исследований аварийных режимов – разработка эффективных мероприятий по ликвидации аварии и нормализации параметров шахтной атмосферы [5]. С ростом количества выработок и количества аэродинамических связей между ними возрастает сложность проведения анализа аварийных ситуаций, связанных, к примеру, с возникновением и развитием подземных пожаров. Особенно сильно это проявляется в случае наличия большого количества горизонтов, расположенных на разных высотных отметках, наличия большого количества наклонных и вертикальных выработок. Таким образом кроме быстроты проведения расчета аварийного режима большое внимание при разработке данного инструментария уделялось простоте анализа и наглядности расчетов по следующим направлениям:

- распределение расходов воздуха,
- распределение температур воздуха,
- распространение продуктов сгорания,
- распределение перепадов давления.

Численное значение вышеперечисленных параметров для удобства анализа состояния вентиляционной сети, с учетом влияния, может быть дополнено отображением градиентных заливок, упрощающих поиск проблемных мест (Рисунок 1). Для апробации алгоритма была взята сеть произвольной топологии, содержащая 271 расчетную ветвь. В качестве места возникновения пожара выбран наклонный транспортный съезд с нисходящим направлением движения воздуха. Время расчета аварийного режима для данной сети составило 3,5 секунды.

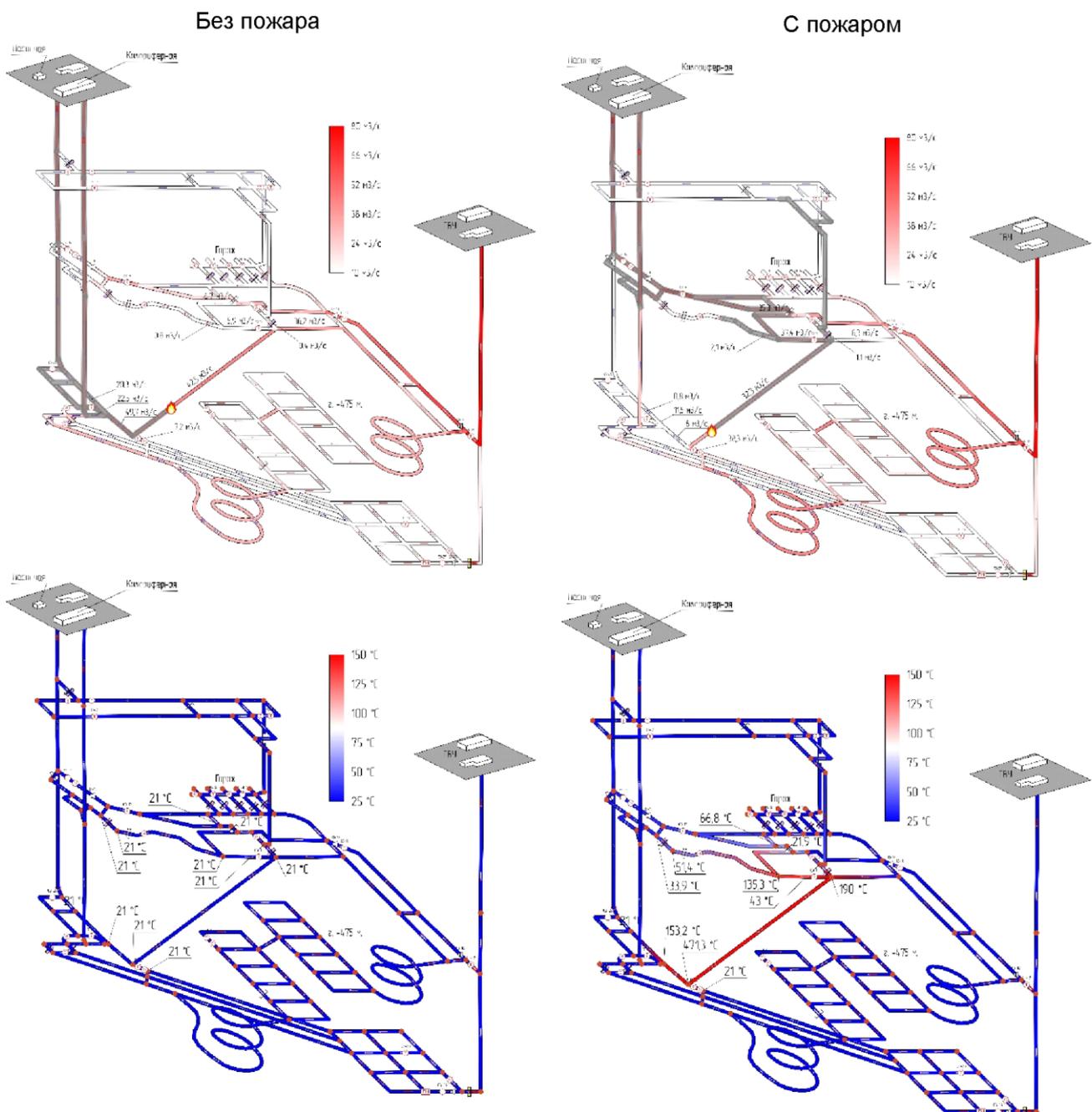


Рис. 1. Визуализация расчета устойчивости при пожаре в наклонной горной выработке

Как видно из рисунка расчет устойчивости в наклонной горной выработке показал, что расход в данной выработке изменится значительно и произойдет опрокидывание воздушной струи, что в свою очередь приводит к изменению направления распространения продуктов сгорания. Также проведенный расчет позволяет оценить температуру воздуха в сопряженных с очагом пожара горных выработках. Данная информация может быть полезна на стадии составления оперативной части плана по локализации и ликвидации последствий аварий, а также корректировки уже принятых решений в случае возникновения аварийной ситуации, с точки зрения определения оптимального пути подхода спасателей и вывода горнорабочих с опасного участка.

Работа выполнена в рамках Программы ФНИ, тема № 0422-2019-0145-С-01 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В., Семин М.А. Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников // Изв. вузов. Горн. журн. – 2016. – № 1. – С. 22-30.
2. 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.
3. 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.
4. Шалимов А.В. Численное моделирование газовоздушных потоков в экстремальных ситуациях и аварийных режимов проветривания рудников и шахт // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 6. – С. 84-92.
5. Васенин И.М., Костеренко В.Н., Крайнов А.Ю., Лукашев О.Ю., Палеев Д.Ю., Шрагер Э.Р. Газодинамический метод расчета нестационарных нормальных и аварийных режимов проветривания шахты // Пожарная безопасность. – 2018. – № 1. – С. 32-41.
6. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways // International Journal of Mining and Geological Engineering. – 1986. – V. 4, № 3. – P. 165-195.
7. Lowndes I.S., Crossley A.J., Yang Z.-Y. The ventilation and climate modelling of rapid development tunnel drivages // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2004. – V. 19, № 2. – P. 139-150.
8. Шалимов А.В., Кормщиков Д.С., Газизуллин Р.Р., Семин М.А. Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 12. – С.41-47.
9. Van der Schaft A. Modeling of physical network systems // Systems and Control Letters. – 2017. – V. 101. – P. 21-27. DOI: 10.1016/j.sysconle.2015.08.013.
10. De Freitas M.A.A., Bonifácio A.S., Robbiano M., San Martín B. On matrices associated to directed graphs and applications // Linear Algebra and Its Applications. – 2014. – V. 442. – P. 156-164. DOI: 10.1016/j.laa.2013.07.005.
11. Руководство по выбору эффективных режимов проветривания шахт при авариях: утв. 22.04.86 / ВНИИГД. – Донецк, 1986. – 131 с.: ил.
12. 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 // Горный журнал. – 2014. – №12. – С. 105-109.
13. Левин Л.Ю., Палеев Д.Ю., Семин М.А. Расчет устойчивости воздушных потоков в выработках шахтных вентиляционных сетей по фактору тепловой депрессии // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2020. – № 1. – С. 81-85.
14. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт: утв. 10.04.74. – М.: Недра, 1975. – 238 с.