

2. Кормщиков Д.С., Кузьминых Е.Г., Семин М.А. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.
3. Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г., Ольховский Д.В. Безопасность реверсирования воздушных потоков в шахтах и рудниках в холодное время года // Вестник государственной экспертизы. – 2022. – № 1. – С. 66-73.
4. Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Повышение безопасности эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи в холодное время года на глубоком руднике // Горное эхо. – 2022. – № 3 (88). – С. 74-80. – DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.
5. Семин М.А., Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Тепловые процессы в вентиляционном стволе глубокого рудника при реверсировании воздушной струи в холодное время года // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 112-123. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.
6. Колесов Е.В., Семин М.А., Казаков Б.П., Князев Н.А. Совершенствование метода расчета коэффициента теплоотдачи шахтного вентиляционного ствола по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 3. – С. 57-71. – DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57.
7. Левин Л.Ю., Семин М.А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 120-130. – DOI:10.15372/FTPRPI20190214.
8. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations // Journal of Mining Science. – 2014. – V. 50, № 2. – P. 371-378. – DOI: 10.1134/S1062739114020203.
9. 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.
10. РД 15-11-2007. Методические рекомендации о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях / Фед. служба по экологич., технологич. и атомному надзору. – М.: НТЦ «Пром. безопасность», 2007. – 57 с.
11. МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях: утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 19.09.2006. – 20 с.
12. Кормщиков Д.С., Кузьминых Е.Г., Семин М.А. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.16

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

С.В. Мальцев

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Анализ горно-геологической информации проектируемых и строящихся рудников для добычи полезных ископаемых указывает на необходимость обновления справочной литературы по рудничной вентиляции и подходов к решению вентиляционных задач. В связи с этим в настоящее время перспективным подходом к решению вентиляционных задач является использование методов численного моделирования. В данной работе представлено описание участков, требующих особого внимания при выборе параметров основного вентиляционного оборудования: шахтные стволы большого диаметра, сопряжения стволов с горизонтами и вентиляционными каналами, а также тупиковые выработки большого сечения.

Ключевые слова: шахтный ствол большого диаметра, тупиковые выработки большого сечения, математическая модель, CFD-моделирование, коэффициент аэродинамического сопротивления, диффузия.

Введение

В последнее время для решения вентиляционных задач разной сложности особую актуальность приобрело численное моделирование движения потоков воздуха, что связано с выбором нестандартных геометрических параметров выработок и технологических решений по расположению оборудования. Кроме того, одной из основных причин использования моделирования являются увеличение глубины отработки запасов (до 2000 метров), протяженности сетей горных выработок рудников (более 300 км выработок) и количества главных вентиляторных установок (2-5 штук в одновременной работе). Разработка сетевых моделей вентиляционных сетей рудников не обходится без специального программного обеспечения: Аэросеть, Вентиляция 2.0, VentSim и другие. При этом более детализированный анализ отдельных участков горных выработок с существенно неоднородными по сечению потоками воздуха и примесей проводится не в рамках сетевых одномерных моделей, а с использованием двумерного и трехмерного CFD-моделирования. Для этого используются программные пакеты: Ansys Fluent, Ansys CFX, SolidWorks и другие. Для работы в данных программных пакетах требуются значительные вычислительные мощности, поэтому CFD-моделирование используется, как правило, для локальных участков сети горных выработок (сопряжение «ствол-канал», сопряжения горных выработок, шахтные стволы, тупиковые выработки), где необходимо детализированное исследование физических процессов.

Анализ горно-геологической информации проектируемых и строящихся рудников для добычи полезных ископаемых указывает на необходимость обновления справочной литературы по рудничной вентиляции и подходов к решению вентиляционных задач. Например, в литературных источниках [1-3] коэффициенты аэродинамического сопротивления шахтных стволов приведены в основном для диаметров 5-7 метров. При этом в настоящее время современные горнодобывающие предприятия строят шахтные стволы больших диаметров (в свету $d=7-10$ м). Кроме того, особого внимания при проектировании новых рудников заслуживает определение геометрии каналов (ширина, высота), угла сопряжения каналов относительно стволов. Неправильное определение данных параметров приводит к выбору вентиляционного оборудования с ошибочными характеристиками.

Использование CFD-моделирования позволит исключить ошибки при проектировании режимов проветривания. Правильно подобранные типы крепления, расположение оборудования в стволах, угол наклона каналов позволят уменьшить капитальные затраты (на покупку вентиляционного оборудования, на строительство надшахтного здания) и эксплуатационные затраты (расход электроэнергии на проветривание) на весь срок отработки рудника.

Разработка математических моделей рудников

В работах [4-6] описаны способы и подходы к разработке сетевых моделей рудников и решения вышеизложенных задач. При этом в настоящее время для проектирования и эксплуатации рудников можно выделить участки вентиляционных сетей, требующие особого внимания при моделировании: шахтные стволы большого диаметра, сопряжения стволов с горизонтами и вентиляционными каналами, а также тупиковые выработки большого сечения.

Актуальность определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов обусловлена потерей основной части депрессии главной вентиляторной установки на них [7, 8]. Основными причинами потери давления при движении воздушного потока по стволу являются шероховатость поверхности ствола, различные препятствия на пути движения воздуха и большие объемы воздуха, поступающие в ствол.

В связи с отсутствием данных для проектирования стволов большого диаметра (более 7 метров) автором данной работы рекомендуется комплексно подходить к вопросу

выбора типа крепления, армирования, ходового отделения, расположения труб и кабелей. Для определения оптимального варианта применяются предварительные расчеты методами вычислительной гидрогазодинамики, на основе которых предварительно перед проектированием можно рассчитать различные комбинации типов крепления стволов, армировки и расположения оборудования. На рисунке 1 изображен пример трехмерной математической модели шахтного ствола с учетом тубинговой крепи, жесткой армировки и трубопровода.

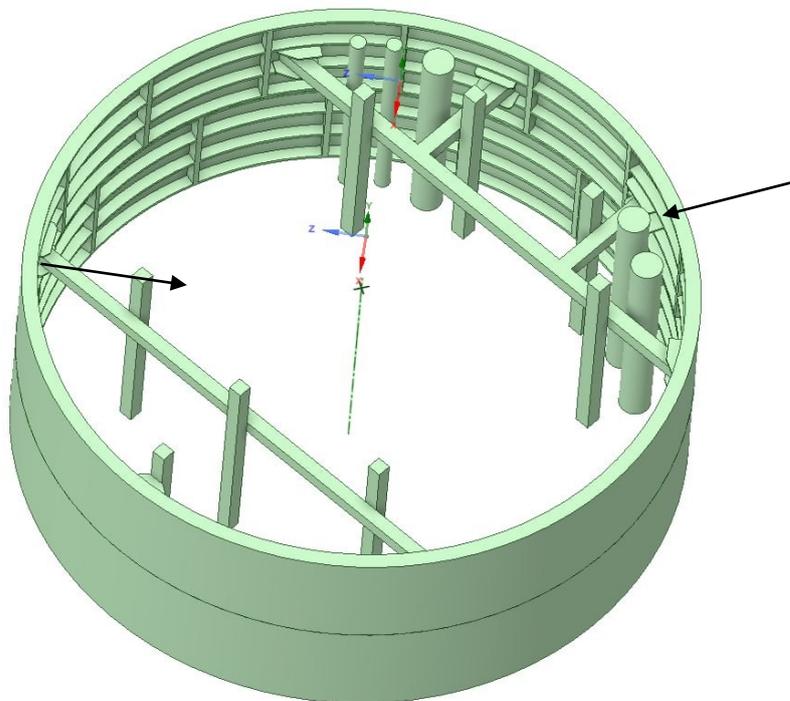


Рис. 1. Участок расчетной области ствола с тубинговой крепью, армированием и расположением трубопровода

По результатам моделирования распределения воздушных потоков рассчитывается коэффициент аэродинамического сопротивления ствола для дальнейшего учета в сетевой модели при определении рабочей точки главной вентиляторной установки.

Второй исследуемой областью, требующей особого внимания, являются сопряжения стволов с калориферным и вентиляционным каналами, а также сопряжения стволов с горизонтами. Задача определения оптимальных геометрических параметров вентиляционных и калориферных каналов, их сопряжений со стволами по фактору минимальных суммарных аэродинамических сопротивлений должна осуществляться на стадии проектирования рудника. Для решения задачи необходимо построить топологию участка сопряжения горизонтальной выработки (горизонт, калориферный или вентиляционный канал) и ствола. Далее производится создание расчетной сетки и задание параметров для выполнения расчетов. При проведении моделирования производится корректировка углов сопряжения горизонтальной выработки со стволом (рис. 2).

Далее по результатам моделирования распределения воздушных потоков рассчитывается коэффициент местного аэродинамического сопротивления при повороте (расширении, сужении), для дальнейшей оптимизации геометрических параметров каналов и горизонтальных выработок (высоты, ширины, угла сопряжения со стволом, радиуса скругления на сопряжениях, угла раскрытия внешней или внутренней стенки диффузора), а также учета в сетевой модели при определении рабочей точки главной вентиляторной установки.

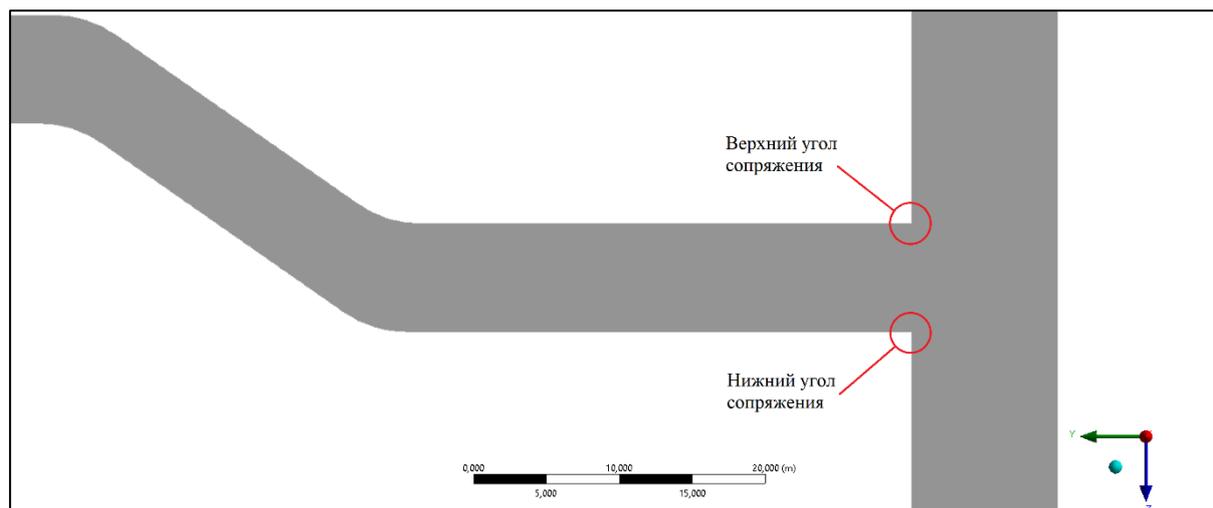


Рис. 2. Изображение сопряжения вентиляционного канала и участка ствола с изображением углов для оптимизации параметров

Третьей областью исследования, требующей особого внимания, являются тупиковые горные выработки большого сечения. Актуальность данной задачи обусловлена тем, что в соответствии с п. 160 ФНиП ПБ «Действующие горные выработки должны непрерывно проветриваться активной струей воздуха, за исключением тупиков длиной 10 метров, проветриваемых за счет диффузии». При этом в условиях действующих рудников в тупиковых выработках большого сечения протяженностью 60 м наблюдается устойчивое распределение потоков воздуха с интенсивным массообменом, обеспечивающим вынос газов от взрывных работ и от работы техники с двигателями внутреннего сгорания за приемлемое время. На рисунке 3 представлена добычная панель одной из шахт, на которой проветриваются протяженные тупиковые выработки большого сечения. Их проветривание осуществляется за счет вентиляторных установок эжекторного типа с камерой смешения без перемычки (ВУМП-6).

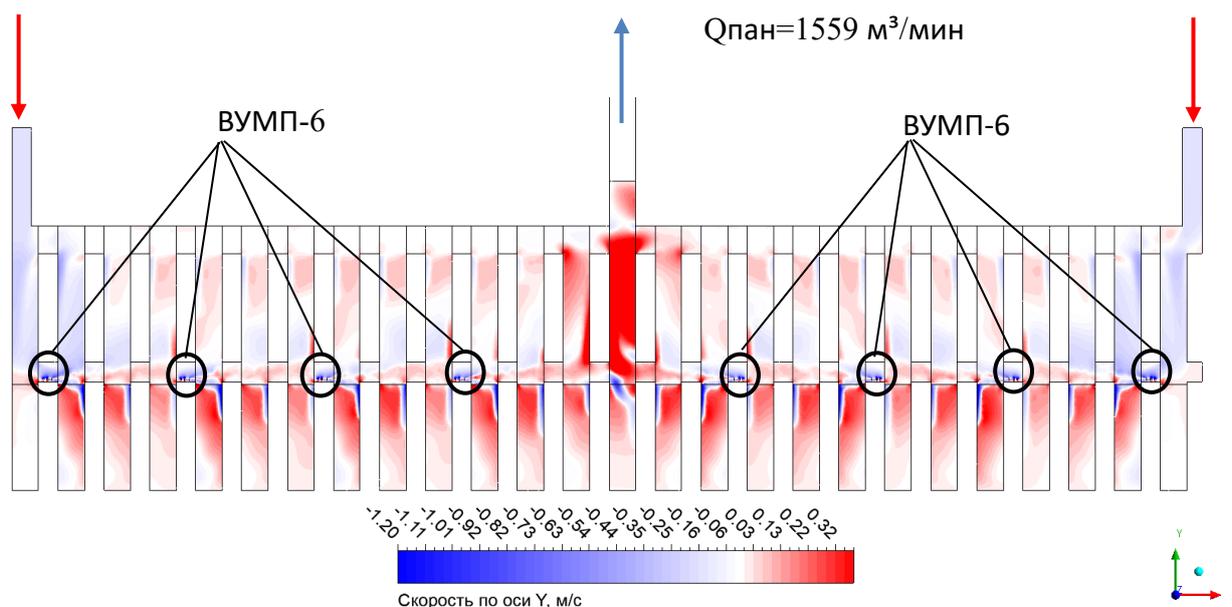


Рис. 3. Распределение скоростей воздуха в тупиковых выработках большого сечения (132 м^2) в пределах исследуемой панели

Анализируя распределения скоростей движения воздуха на рисунке 3, можно сделать вывод, что активный воздухообмен наблюдается во всех тупиковых выработках. По результатам численного моделирования [9] определена средняя скорость движения воздуха в тупиковых выработках панели, далее рассчитан расход воздуха. В первой камере после вентиляторной установки расход воздуха составляет 253 м³/мин, во второй – 145 м³/мин, в третьей – 118 м³/мин, в четвертой – 65 м³/мин. При этом расчетное значение составляет 109 м³/мин (по фактору буровзрывных работ). Таким образом, одной вентиляторной установки эжекторного типа с камерой смешения без перемычки достаточно, чтобы обеспечить проветривание трех тупиковых выработок сечением 132 м² с протяженностью 60 м по фактору «буровзрывных работ» расчета количества воздуха. В связи с этим дальнейшие исследования целесообразны с учетом распределения газов от взрывных работ и газов от двигателей внутреннего сгорания.

Заключение

В данной работе представлены вопросы разработки CFD-моделей участков выработок, требующих особого внимания при проектировании подземных рудников и выборе вентиляционного оборудования. Разработка технических решений на основании численного моделирования позволит оптимизировать капитальные затраты при строительстве выработок и эксплуатационные затраты при разработке месторождений.

В дальнейшем планируется:

- разработка методики для определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов путем CFD-моделирования;
- разработка и составление справочного пособия коэффициентов аэродинамического сопротивления для стволов большого диаметра (7-10 м);
- определение оптимизационных решений для снижения сопротивления вентиляционных и калориферных каналов;
- моделирование динамики газов от взрывных работ и от двигателей внутреннего сгорания для определения эффективной длины тупиковой выработки при различных сечениях по фактору проветривания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Скочинский А.А., Ксенофонтова А.И., Харев А.А., Идельчик И.Е. Аэродинамическое сопротивление шахтных стволов и способы его снижения. – М.: Углетехиздат, 1953. – 364 с.
2. Аэродинамическое сопротивление горных выработок и тоннелей метрополитена / Ф.А. Абрамов, В.А. Долинский, И.Е. Идельчик и др. – М.: Недра, 1964. – 187 с.: ил.
3. McPherson M.J. The resistance to airflow of mine shafts // Proceedings of the Mine Ventilation Symposium 3rd, 12-14.10.1987. – Pennsylvania, 1987. – P. 465-477.
4. 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.
5. 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.
6. Мальцев С., Исаевич А., Кормщиков Д. Современные способы разработки математических моделей вентиляционных сетей подземных рудников // Вестн. гос. экспертизы. – 2023. – № 1. – С. 34-42.
7. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил.
8. Мальцев С.В. Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: дис. ...к.т.н.; 25.00.20 / Мальцев Станислав Владимирович. – Пермь, 2019. – 148 с.
9. Мальцев С.В., Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Семин М.А. Исследование динамики процесса воздухообмена в системе тупиковых и сквозной выработок большого сечения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 2. – С. 46-57. – DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-46-57.