

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Розенберг Л.С., Рудяк К.Б., Исаев В.Б., Лебединский А.А., Дозорцев В.М., Антонов А.В. Повышение эффективности работы установки первичной переработки нефти с помощью системы усовершенствованного управления // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 2. – С. 6-12.
2. Милаевская С.С. Особенности внедрения процессного подхода к управлению предприятиями агропромышленного комплекса (на примере мясного скотоводства) // Экономический анализ: теория и практика. – 2011. – № 33. – С. 26-36.
3. Mesenbourg T.L. Measuring the Digital Economy. U.S. Bureau of the Census. 2001.
4. Толковый словарь по искусственному интеллекту / авт.-сост. А.Н. Аверкин и др. – М.: Радио и связь, 1992. – 254 с.
5. Мельников Н.Н., Калашник А.И. Создание многоуровневой системы геодинамического мониторинга горнотехнических и нефтегазовых объектов западной части российского сектора Арктики // Арктика: экология и экономика. – 2015. – № 3 (19). – С. 66-75.
6. Билински А., Власенко Б.В., Грицко Г.И., Юневич Ст., Неробиш А. Геомеханический мониторинг очистных механизированных забоев при отработке угольных пластов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1991. – №5. – С. 94-101.
7. Левин Л.Ю., Зайцев А.В., Семин М.А. Контроль теплового режима породного массива на основе применения оптоволоконных технологий мониторинга температур в скважинах // Горное эхо. 2016. № 1 (62). С. 35-37.
8. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Контроль и прогноз формирования ледопородного ограждения с использованием оптоволоконных технологий // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 14 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2016. – С. 236-238.
9. 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.
10. Дорман Я.А. Искусственное замораживание грунтов при строительстве метрополитенов. – М.: Транспорт. – 1971. – 271 с.: ил.
11. Трупак Н.Г. Замораживание горных пород при проходке стволов. – М.: Углетехиздат, 1954. – 896 с.: ил.
12. Бенуэлл К.Н. Основы молекулярной спектроскопии: Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 384 с.: ил.
13. «Frozen Wall»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2018666337 / Богомяков А.В., Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Пугин А.В., Семин М.А.; заявитель и правообладатель ПФИЦ УрО РАН. – 2018663501; заявл. 28.11.2018; зарегистрировано 17.12.2018; опублик. 17.12.2018.
14. Левин Л.Ю., Семин М.А., Паршаков О.С. Математическое прогнозирование толщины ледопородного ограждения при проходке стволов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2017. – № 5. – С. 154-161.
15. Левин Л.Ю., Семин М.А., Зайцев А.В. Решение обратной задачи Стефана при анализе замораживания грунтовых вод в породном массиве // Инженерно-физический журнал. – 2018. – Т. 91, №3. – С. 655-663.
16. Головатый И.И., Левин Л.Ю., Паршаков О.С., Диулин Д.А. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 48-53. DOI: 10.17580/gzh.2018.08.06.
17. Кормщиков Д.С. Исследование и разработка систем аэрогазодинамической безопасности подземных рудников: автореф. дис. ... к.т.н.; 25.00.20 / Кормщиков Денис Сергеевич. – Пермь, 2015. – 24 с.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2019.3.20

**ПРОБЛЕМА МНОГОФАКТОРНОСТИ В МОДЕЛИРОВАНИИ РУДНИЧНЫХ АЭРОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЕЁ РЕШЕНИЕ В АНАЛИТИЧЕСКОЙ ПРОГРАММЕ «АЭРОСЕТЬ»**

Б.П. КАЗАКОВ

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье рассмотрены особенности построения компьютерных моделей рудничных вентиляционных сетей. Взаимосвязанность различных физических процессов в рудничной атмосфере и окружающем породном массиве приводит к тому, что в некоторых ситуациях для получения корректного и полного представления о протекающих в руднике аэрологических процессах необходимо производить комплексное моделирование распределения аэродинамических и термодинамических параметров воздуха, распределения концентрации вредных газов и пыли. Основные, наиболее востребованные на практике математические модели и методы расчёта рудничных аэрологических процессов, реализованные в аналитической программе «АэроСеть», описаны в настоящей статье.

**Ключевые слова:** рудничная вентиляция, горная теплофизика, вентиляционная сеть, АэроСеть, математическое моделирование.

Главная трудность моделирования поведения сложной физической системы, какой, по сути, является рудничная вентиляционная сеть, состоит в комплексном учёте

всех значимых факторов, определяющих это поведение. Отдельные аналитические, полуаналитические и численные модели выборочно описывают механизмы изучаемых процессов, но не дают полной картины, адекватное представление о которой можно получить лишь на основе анализа всей совокупности моделей. Для решения этой проблемы в отделе аэрологии и теплофизики разработана аналитическая программа «АэроСеть» [1], которая постоянно совершенствуется, дополняясь новыми функциональными возможностями и не учитываемыми ранее факторами, влияющими на проветривание, теплофизические параметры рудничного воздуха и породного массива.

Состояние рудничной атмосферы определяется пятью основными контролируемыми параметрами воздуха – расходом, температурой, влажностью, загазованностью и запылённостью. Параметры эти зависят от множества факторов, имеют разные величины в разных точках вентиляционной сети и меняются со временем. Каждая из этих характеристик воздуха определяет комфортные условия ведения горных работ и имеет предельно допустимые значения, выход за пределы которых означает возникновение аварийных ситуаций, угрожающих безопасности людей и сохранности оборудования. Современные рудники представляют собой сложные динамические системы, изменения в которых происходят как под действием естественных факторов, так и в результате техногенного воздействия. К естественным факторам относятся температура и влажность атмосферного воздуха, от которых зависит его плотность и, соответственно, величина естественной тяги. Искусственные изменения – результат деятельности человека: разработка новых горизонтов, добавление новых рабочих участков, выработок, вентиляционных сбоек, перемычек, источников тяги и т.д. Они оказывают влияние на движение, чистоту и термодинамические характеристики воздуха в отдельных выработках и в руднике в целом. Изменения эти должны быть предсказуемы во избежание возникновения аварийных ситуаций, а прогнозирование систем подобной сложности возможно лишь на основе комплексного математического моделирования.

Очевидно, что каждая из перечисленных характеристик воздуха зависит не только от процессов, протекающих непосредственно в воздухе, но и от процессов, протекающих в породном массиве и шахтном оборудовании, контактирующими с воздушным потоком. Воздух приводится в движение вентиляторами различного типа, обменивается теплом с породным массивом, взаимодействие с которым приводит также к изменению влагосодержания (испарение-конденсация) и загазованности (выделения газа и сорбция), нагревается калориферными и охлаждается холодильными установками, нагревается и насыщается пылью в рабочих зонах от работающих комбайнов. Поэтому система «рудничный воздух – породный массив – шахтное оборудование» является взаимосвязанной, и точное выделение из неё подсистемы, имеющей отношение непосредственно к воздуху, невозможно. Соответственно, при моделировании такой системы используется широкий спектр физико-математических моделей, увязываемых между собой в единой программной среде с целью получения максимально полной и точной картины исследуемого процесса.

Основные, наиболее востребованные на практике математические модели и методы расчёта рудничных аэрогазотермодинамических процессов, реализованные в программе на сегодняшний день и использующиеся для решения прикладных задач имеют следующую структуру.

- Моделирование работы эжекторных установок для организации рециркуляционного проветривания позволяет добиться значительного улучшения вентиляции рабочих зон при минимальных затратах электроэнергии [2].
- Потери депрессии на сопряжениях горных выработок оказываются существенными в местах сопряжения стволов с горизонтами и калориферными каналами, а также на любых сопряжениях горных выработок больших сечений [3, 4].
- Учёт инерционности воздушных потоков необходим при моделировании аварийных процессов, связанных с рудничными пожарами, отключениями и реверсированиями главной вентиляционной установки [5].
- Влияние отработанных пространств на переходные процессы нестационарного воздухораспределения после останова или реверса вентилятора моделируется на основе решения общей системы уравнений, т.к. метод контурных расходов оказывается непригодным для описания движения сжимаемой среды [6].
- При описании процессов переноса вредных примесей используется модель идеального вытеснения, в рамках которой частицы газа или дыма пассивно переносятся воздушным потоком с возможностью сорбции поверхностью породного массива (рис. 1).

• Перенос влаги, в отличие от газа и пыли, тесно связан с температурой воздуха, изменяющейся по ходу движения. Но основе предварительного расчёта температурных изменений воздуха определяются интенсивности испарения и конденсации влаги, позволяющие прогнозировать время, протяжённость и количество выпадающей влаги и её миграцию вглубь рудника в зимний период [7].

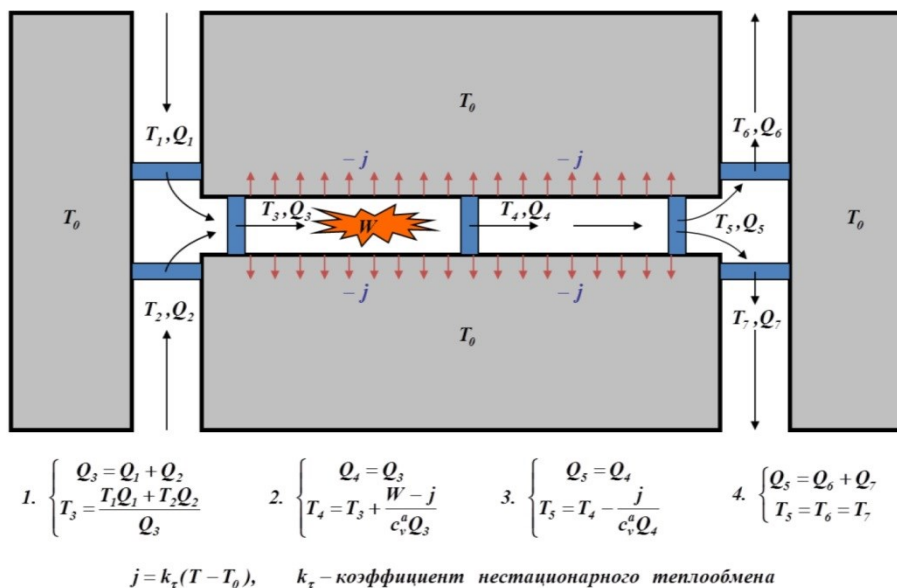


Рис. 1. Перенос теплоты и вредных примесей по выработкам вентиляционной сети в рамках модели идеального вытеснения

• В первом приближении перенос тепла воздухом также описывается моделью идеального вытеснения с заданным коэффициентом теплообмена (рис.1). Учитываются также специфические эффекты теплового режима воздуха в стволах – геотермическое увеличение температур пород с глубиной и разогрев воздуха в результате его гидростатического сжатия. Процессы переноса тепла и примесей смоделированы в программе в виде отдельного модуля теплогазодинамического расчёта.

• Коэффициент теплообмена не является величиной заданной и постоянной. Определяется он либо с помощью аналитических зависимостей различного уровня сложности, либо на основании точного решения задачи теплообмена в сопряжённой постановке [8].

• Для описания сложной динамики тепловых депрессий разработана модель расслоения воздушных потоков по сечению горных выработок, на основании которой удаётся получать адекватную картину движения воздуха в зоне рудничных пожаров, а также в стволах после отключения главного вентилятора и определять величину естественной тяги [9].

• Отдельное направление математического моделирования – развитие энергосберегающих технологий проветривания. В соответствии с требованиями безопасности каждый участок рудника должен быть обеспечен определённым количеством свежего воздуха. Есть множество способов этого обеспечения, из которых целесообразно выбирать наименее энергоёмкий. Для этих целей разработан алгоритм оптимального регулирования воздухораспределения средствами отрицательного регулирования с минимизацией нагрузки на главный вентилятор. Алгоритм реализован численно на базе метода контурных расходов и позволяет в автоматическом режиме находить оптимальные решения при заданных параметрах вентиляционной сети, и может также использоваться для проектирования вентиляции [10].

• При отсутствии достаточного количества данных о параметрах вентиляционной сети информация считывается с датчиков, и работа приведённого алгоритма оказывается крайне медленной из-за большого количества операций. Для осуществления управления проветриванием в реальном времени разработан упрощённый алгоритм с возможностью редактирования его в сложных ситуациях [11, 12].

Реализованный в программе функционал позволяет не только получать максимально приближённую к реальности картину протекания многофакторных аэрологических процессов, но и производить аналитические исследования значимости каждого из факторов в решении конкретной поставленной задачи. Такая структура интерфейса программы (рис.2)

обеспечивает эффективность решения ресурсоёмких задач оптимизации и управления аэрологическими процессами, т.к. позволяет выявлять и отключать незначительные механизмы, повышая тем самым устойчивость и скорость сходимости численных алгоритмов.

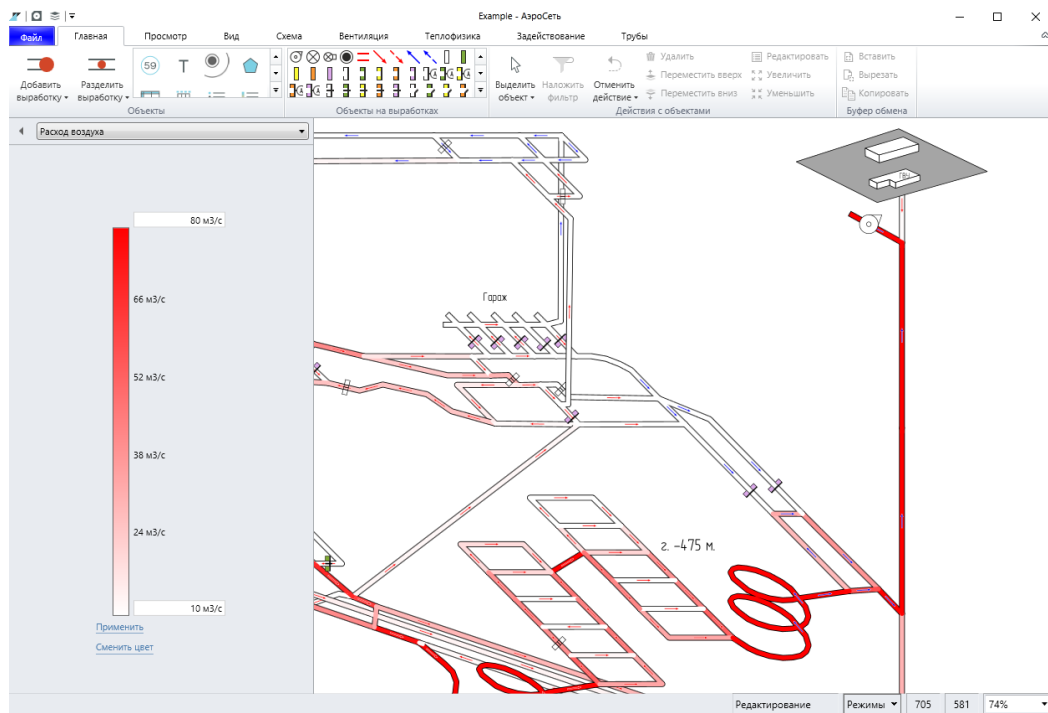


Рис. 2. Аналитическая программа «АэроСеть»

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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; опубл. 20.02.2015. – 1 с.
2. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Анализ существующих методов расчёта эффективности работы эжекторных установок в рудниках // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле.. – 2012. – №1. – С. 40-46.
3. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Расчет местных аэродинамических сопротивлений в моделях вентиляционных сетей шахт и рудников // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2018. – № 3. – С. 265-278.
4. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Экспериментальное исследование изменения воздушораспределения на калийных рудниках при реверсировании главной вентиляторной установки // Вестн. ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17.– С.89-97.
5. Шалимов А.В., Зайцев А.В., Гришин Е.Л. Расчет нестационарного воздушораспределения в рудничных вентиляционных сетях с учетом инерционности воздуха // Горное эхо. – 2009. – № 4 (38). – С. 24-28.
6. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Моделирование динамики выхода воздушных масс из выработанных пространств рудника после остановки или реверсирования источника тяги нагнетательного действия // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2017. – № 11. – С. 76-81.
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Исследование процессов миграции конденсационных расолов в выработках калийных рудников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2016. – № 11. – С. 216-225.
8. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподающего ствола и породным массивом // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 92-98.
9. 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.
10. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Разработка энергосберегающей системы автоматического управления проветриванием рудников // Изв. вузов. Горн. журн. – 2012. – № 3. – С. 57-63.
11. Круглов Ю.В., Семин М.А., Зайцев А.В. Математическое моделирование работы оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Изв. Тульского гос. ун-та. Науки о Земле. – 2011. – № 2. – С. 116-126.
12. 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.