

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Жикин А.А., Глебов С.В., Герасимова И.Ю. О перспективах малоглубинной сейсморазведки 3D на Верхнекамском месторождении солей // Геофизика. – 2015. – № 5. – С. 6-11.
2. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г. Опыт применения сейсморазведки ОГТ для решения инженерно-геологических задач // Геофизика. – 2004. – № 3. – С. 27-30.
3. Санфиров И.А., Ярославцев А.Г., Бабкин А.И. О результатах применения малоглубинной сейсморазведки МОГТ на территории ВКМКС // ГеоЕвразия 2018. Современные методы изучения и освоения недр Евразии: тр. Междунар. геолого-геофизич. конф., 05-08 февр. 2018 г. / ООО «Центр анализа сейсмологич. данных МГУ». – М., 2018. – С. 664-668.
4. Бобров В. Ю. Сравнительный анализ источников упругих колебаний для инженерных сейсморазведочных работ // XIX Уральская молодежная научная школа по геофизике: сб. науч. материалов / ИГФ УрО РАН [и др.]. – Екатеринбург, 2018. – С.27-29.

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА  
И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2019.3.19

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Л.Ю. ЛЕВИН

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе описано два примера внедрения систем мониторинга в горной промышленности специалистами отдела Аэрологии и теплофизики: интеллектуальная система мониторинга состояния замороженного породного массива при проходке стволов в сложных гидрогеологических условиях и автоматизированная система мониторинга аэрогазодинамических параметров рудничной атмосферы. Описаны основные комплексы измерительного оборудования, средств передачи и обработки сигналов и программное обеспечение для интерпретации и визуализации данных мониторинга.

**Ключевые слова:** интеллектуальная система, мониторинг температур, мониторинг расходов воздуха, аэрогазодинамическая безопасность, рудничная вентиляционная сеть, шахтный ствол, ледопородное ограждение, искусственное замораживание пород.

**Введение**

В последние годы в различных областях промышленности все более активно начинают внедряться системы мониторинга и управления различными технологическими процессами [1, 2]. Это обусловлено развитием методов измерения, передачи, обработки и визуализации различных данных о параметрах физических и технологических процессов и является одним из аспектов перехода к цифровой экономике [3] и одним из приоритетов экономической политики России. Конечной целью внедрения систем мониторинга и управления технологическими процессами следует считать повышение энергоэффективности и безопасности функционирования производства.

Системы мониторинга в общем случае могут быть классифицированы на несколько видов в зависимости от задач, накладываемых на них, и функций, оставленных на выполнение человеку-оператору:

- 1) автоматизированная,
- 2) автоматическая,
- 3) интеллектуализированная,
- 4) интеллектуальная.

Если *автоматизированная* система допускает выполнение человеком-оператором некоторых функций (наиболее общего, целеполагающего характера или же не поддающихся автоматизации), то *автоматическая* система обрабатывает информацию, формирует команды и преобразовывает их в воздействия на управляемый объект без участия человека. В случае, если автоматизированная система при обработке и анализе измеряемых данных использует методы искусственного интеллекта, то такую систему правильнее называть *интеллектуализированной*. При этом *интеллектуальной* системой является система, использующая методы искусственного интеллекта и не предполагающая участия человека-оператора.

Под методами искусственного интеллекта здесь понимаются различные методы решения творческих, плохо формализуемых задач [4]. Такими творческими задачами могут быть, к при-

меру, задачи связанные с анализом рассогласований между показаниями датчиков в различных местах объекта, принятием решений о необходимости калибровки измерительных датчиков или корректировки параметров математической модели исследуемой технической системы.

Возвращаясь к вопросу об активном внедрении систем мониторинга и управления в различных областях промышленности, следует отметить, что горная промышленность не является исключением и ей также свойственен этот тренд [5, 6]. В данной статье речь пойдет о двух примерах внедрения систем мониторинга в горной промышленности:

- 1) интеллектуальной системе мониторинга состояния замороженного породного массива при проходке стволов в сложных гидрогеологических условиях,
- 2) автоматизированной системе мониторинга аэрогазодинамических параметров рудничной атмосферы.

Соответствующие комплексы измерительного оборудования, средств передачи и обработки сигналов и программное обеспечение для интерпретации и визуализации данных активно разрабатываются отделом Аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН [7 – 9].

### Мониторинг состояния замороженного породного массива

При проходке стволов в сложных гидрогеологических условиях применяются специальные способы. Одним из наиболее распространенных является способ искусственного замораживания горных пород. Суть способа заключается в бурении по контуру будущего ствола скважин, в которые опускаются замораживающие колонки. За счет работы замораживающих станций и компрессорного оборудования по колонкам осуществляется циркуляция хладоносителя (замораживающего рассола), в результате чего породный массив постепенно охлаждается, а содержащаяся в массиве вода кристаллизуется. По истечении некоторого времени вокруг замораживающих колонок образуются одиночные ледопородные цилиндры, которые в дальнейшем смыкаются, образуя сплошное ледопородное ограждение (ЛПО), предотвращающее попадание грунтовых вод в строящуюся горную выработку [10, 11].

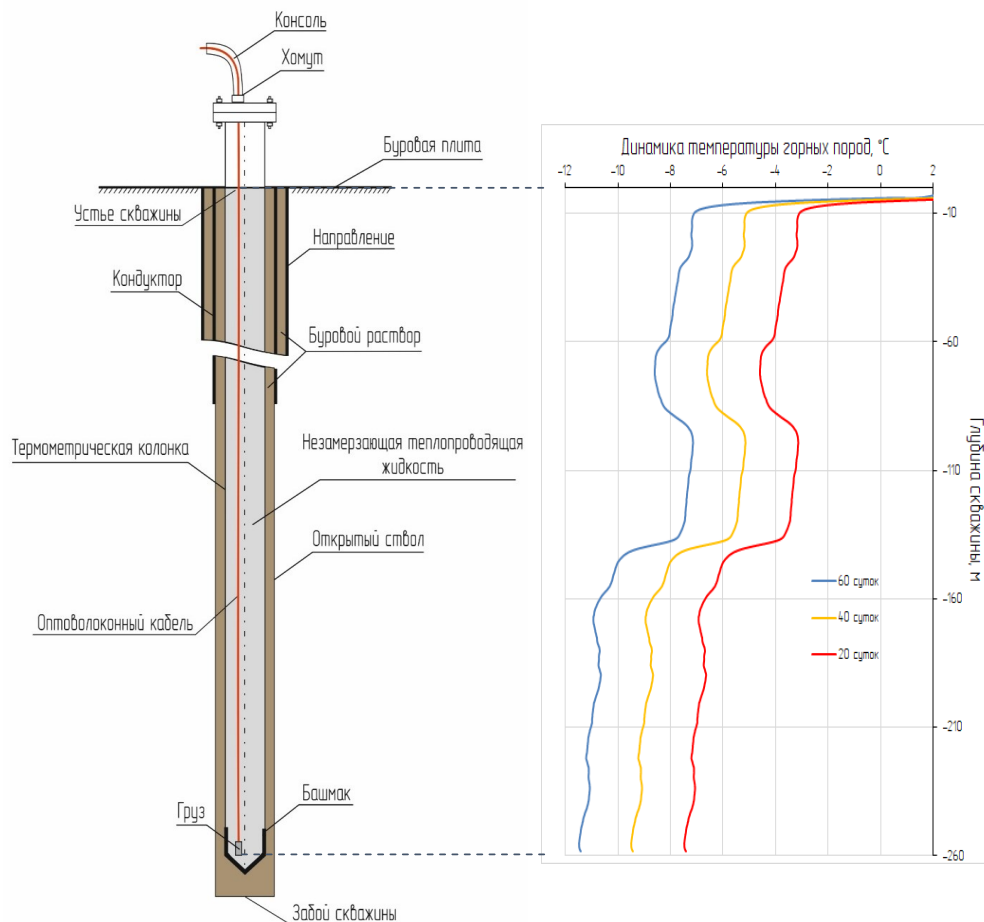


Рис. 1. Устройство контрольно-термической скважины, график распределения температуры породного массива по глубине контрольно-термических скважин

Предложенная специалистами отдела Аэрологии и теплофизики система мониторинга ЛПО предусматривала проходку нескольких вертикальных контрольно-термических скважин в окрестности формирующегося ЛПО. В контрольно-термические скважины погружался оптоволоконный кабель, являющийся распределенным датчиком измерения температуры среды. Начало и конец оптоволоконного кабеля были подключены к волоконно-оптическому регистратору (интеррогатору), пропускающему сигналы по замкнутому контуру оптического волокна. Измерение температуры вдоль длины оптоволоконного кабеля в данной ситуации основывалось на эффекте Рамана [12]. Обработка полученного интеррогатором сигнала и ряд сопутствующих компьютерных вычислений позволяют в конечном счете определять температуру по длине оптоволоконного кабеля (с пространственным разрешением до 25 см). Таким образом, определяется распределение температуры в массиве по всей глубине контрольно-термических скважин (см. рис. 1).

Измеренные температуры породного массива обрабатываются и усредняются по заданному временному промежутку (порядка часов) и в режиме реального времени передаются на хранение в базу данных на сервере системы, находящемся на промплощадке рудника. Обработанные кривые температур породного массива в контрольно-термических скважинах выводятся в окне программы “FrozenWall” [13, 14], разработанной специалистами отдела и устанавливаемой на автоматизированном рабочем месте специалиста на руднике.

На сервере системы мониторинга также хранится термогидродинамическая модель обводненного многослойного породного массива. Модель используется программой “FrozenWall” и позволяет осуществлять прогнозирование параметров ледопородного ограждения в будущем при применении различных технологических процессов и мероприятий. Программа “FrozenWall” также имеет расчетный модуль, который производит уточнение параметров термогидродинамической модели на предмет наилучшего соответствия с данными измерений посредством решения обратной задачи теплопереноса [15]. Для численного решения используется метод естественной регуляризации, позволяющий свести решение обратной задачи к минимизации функционала с помощью комбинации метода градиентного спуска и метода обратного распространения ошибки.

В результате функциональные возможности интеллектуальной системы мониторинга позволили вывести на качественно новый уровень контроль процесса формирования и состояния ЛПО строящихся шахтных стволов №№ 1 – 2 рудника Петриковского Горно-обогатительного комбината и повысить безопасность ведения горных работ. Удалось сократить сроки строительства ствола № 1 в обводненном массиве на 63 сут по сравнению с проектом. Это стало возможно за счет выбора оптимальных параметров работы замораживающего комплекса [16].

### **Мониторинг аэрогазодинамических параметров рудничной атмосферы**

Современные горнодобывающие предприятия в условиях увеличения производственных мощностей по добыче полезных ископаемых увеличивают глубину добычи и площадь шахтных полей. Это приводит к значительному усложнению и разветвлению вентиляционных сетей рудников. Удаление очистных работ от шахтных стволов затрудняет подачу свежего воздуха и усложняет обеспечение безопасных условий труда горнорабочих.

Для обеспечения безопасной добычи полезных ископаемых необходимо осуществлять контроль параметров рудничной атмосферы: количества воздуха, требуемого для проветривания, его температуры и компонентного состава. Для достижения данной цели специалистами отдела Аэрологии и теплофизики разработана система аэрогазодинамической безопасности шахт и рудников, основанная на интеграции математической модели вентиляционной сети и показаний измерительных датчиков, обеспечивающая оперативное определение расходов воздуха во всех горных выработках и прогнозирование распространения продуктов горения [17].

Концепция системы аэрогазодинамической безопасности разработана на основе алгоритма решения обратной задачи воздушораспределения [9] на расчетной модели вентиляционной сети. Решение обратной задачи воздушораспределения основано на данных о фактических расходах воздуха и концентрациях газов в выработках, в которых установлены соответствующие датчики. В результате решения обратной задачи производится калибровка аэродинамических сопротивлений в вентиляционной сети рудника и «достраивается» воздушораспределение во всей вентиляционной сети рудника. Принципиальная схема системы аэрогазодинамической безопасности представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема взаимодействия структурных элементов системы аэрогазодинамической безопасности

Работа данной системы основывается на взаимодействии двух основных элементов:

- Система мониторинга параметров вентиляции, позволяющая прогнозировать расходы воздуха во всех выработках вентиляционной сети рудника (шахты) за счет ограниченного количества датчиков скорости движения воздуха.
- Программные аналитические инструменты для разработки и задействования плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, учитывающие распространение продуктов горения в вентиляционной сети с помощью расчетной модели вентиляционной сети, созданной на основе актуальных экспериментальных данных с рудника.

Предложенная система аэрогазодинамической безопасности позволяет при минимальном количестве датчиков определять воздухораспределение во всех выработках вентиляционной сети рудника. В результате экспериментального исследования работы системы сделан вывод о том, что при уменьшении количества датчиков скорости движения воздуха необходимо соблюдать подобие аэродинамических сопротивлений ветвей, разрабатываемой модели вентиляционной сети.

В ходе работы спроектирован и изготовлен опытный образец автоматической замерной станции. Станция представляет собой стационарный аппарат для построения систем аэрогазодинамической безопасности, осуществляющий замеры расходов воздуха, а также концентраций горючих и токсичных газов. Также разработана методика, позволяющая на основе ошибки определения расходов рассчитать требуемое количество датчиков, необходимых для построения системы аэрогазодинамической безопасности.

Система аэрогазодинамической безопасности реализована на руднике «Таймырский» ОАО «ГМК «Норильский никель». Определено минимальное количество датчиков, позволяющих контролировать воздухораспределение на руднике «Таймырский», и места их установки. Выбрана конечная расстановка из 34 датчиков, объединенных в 20 автоматических замерных станций. При такой расстановке датчиков величина ошибки распределения расходов составляет 14,5 %.

*Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда  
(проект № 19-77-30008).*

## 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