

На правах рукописи



**Мальцев Станислав Владимирович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СЛОЖНЫХ  
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ**

Специальность 25.00.20.

Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная  
теплофизика

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Пермь 2019

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» - филиале Федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук и в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Научный руководитель:**

**Козаков Борис Петрович**

доктор технических наук, профессор,  
главный научный сотрудник отдела  
аэрологии и теплофизики «ГИ УрО РАН» (г.  
Пермь)

**Официальные оппоненты:**

**Кобылкин Сергей Сергеевич**

доктор технических наук, доцент, профессор  
кафедры «Безопасность и экология горного  
производства» Горного института НИТУ  
«МИСиС» (г. Москва)

**Стась Галина Викторовна**

доктор технических наук, доцент кафедры  
«Геотехнологии и строительства подземных  
сооружений» Института горного дела и  
строительства «Тульского государственного  
университета» (г. Тула)

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «**Уральский государственный  
горный университет**» (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «...» ..... 2019 года в ..... часов на заседании диссертационного совета Д 004.036.02 при «ГИ УрО РАН» по адресу г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «ГИ УрО РАН»: <http://www.mi-perm.ru>

Автореферат разослан «...» ..... 2019 года

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 15 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и электронная почта лица, представившего его.

Отзывы необходимо направлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а. Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02. E-mail: [bba@mi-perm.ru](mailto:bba@mi-perm.ru)

Ученый секретарь диссертационного  
совета, к.г.-м.н., доцент



Б.А. Бачурин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы диссертации

В настоящее время в связи с исчерпанием легкодоступных запасов полезных ископаемых, находившихся в благоприятных горно-геологических условиях, у производителей появляется необходимость расширения площадей отрабатываемых участков месторождений и переход на глубокозалегающие горизонты для поддержания или увеличения производственных мощностей. С увеличением площадей отрабатываемых участков и глубины ведения горных работ возрастает протяженность сетей горных выработок, рабочие зоны перемещаются на границы шахтного поля. Вследствие этого усложняются схемы проветривания рудников. Возникает потребность в увеличении требуемого количества воздуха, подаваемого в рудник, доведении его до границ шахтного поля. При этом необходимо помнить и об экономии электроэнергии. Удаление фронта ведения горных работ и увеличение требуемого количества рудничного воздуха обычно приводят к необходимости замены главных вентиляторных установок (ГВУ). В случаях, когда одна ГВУ не в состоянии обеспечить все рабочие зоны требуемым количеством воздуха, необходимо использовать несколько главных вентиляторных установок. Например, требуемое количество воздуха для проветривания рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» составляет 78300 м<sup>3</sup>/мин, рудник проветривается четырьмя главными вентиляторными установками типа ВЦД-47 «Север». Для проветривания рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» необходимо 27585 м<sup>3</sup>/мин. Проветривание рудника осуществляется пятью главными вентиляторными установками.

В условиях таких рудников задача обеспечения рабочих зон требуемым количеством воздуха и выбора энергоэффективного режима проветривания сводится к определению степени влияния каждой главной вентиляторной установки на отдельные участки вентиляционной сети, а также к выбору мест установки и определению параметров вентиляционных сооружений. Использование большого количества вентиляционных сооружений, в свою очередь, приводит к увеличению аэродинамического сопротивления вентиляционной сети. Это значит, что для поддержания подачи требуемого количества воздуха необходимо увеличивать производительность главных вентиляторных установок, следовательно, повышать потребление электроэнергии.

При проектировании вентиляции таких рудников важно учитывать и взаимное влияние главных вентиляторных установок, и настраивать режимы их работы таким образом, чтобы каждая из них работала максимально эффективно на свой участок вентиляционной сети. При этом необходимо стремиться к минимизации эксплуатационных энергозатрат на проветривание.

В дальнейшем системы вентиляции, которые характеризуется наличием двух и более главных вентиляторных установок, расположенных на разных стволах и имеющих обособленные зоны влияния, будем называть сложными системами вентиляции.

Вопросами регулирования воздухораспределения, проектирования вентиляции и моделирования аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях в России занимались А.А. Скочинский, И.И. Медведев, А.Е. Красноштейн, Ф.А. Абрамов, Л.А. Пучков, Р.Б. Тянь, С.В. Цой, С.М. Цхай, Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, Ю.В. Круглов, С.С. Кобылкин, Г.В. Стась, А.В. Осинцева и другие. Среди зарубежных исследований известны работы M.J. McPherson, H. Cross, Z.A. Yang, C. Allen.

Традиционно задача определения оптимальных аэродинамических параметров ГВУ и вентиляционных сооружений при проектировании вентиляции рудников решалась депрессионным ходом, без учета распределения в сети. Современное программное обеспечение позволяет решать задачу рационального регулирования расходов воздуха в сети по критериям обеспеченности рабочих зон требуемым количеством воздуха и минимизации потребляемой мощности для одной главной вентиляторной установки.

При проветривании рудника двумя и более ГВУ возникает необходимость разграничения зон влияния каждой из них, а также введения критерия эффективности регулирования параметров источников тяги и вентиляционных сооружений.

Для одновременного регулирования параметров нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений при проектировании рудников со сложными вентиляционными системами необходимо разработать систему эффективного проветривания по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности с оригинальными методическими средствами управления и программными средствами контроля.

В условиях существования государственной программы Российской Федерации «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности на период до 2020 года» разработка системы эффективного проветривания при проектировании рудников со сложными системами вентиляции становится актуальной задачей.

**Целью работы** является повышение эффективности проветривания сложных вентиляционных сетей подземных рудников.

**Основная идея работы** заключается в создании способов, повышающих точность определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем на основе применения методов математического моделирования на этапах

обработки экспериментальных данных и решения задач регулирования воздухораспределения в вентиляционных сетях.

### **Основные задачи работы:**

1. Совершенствование способа разработки математических моделей вентиляционных сетей на основе автоматизации обработки данных воздушно-депресссионной съемки с учетом изменяющегося характера воздухораспределения на рудниках со сложными системами вентиляции.

2. Разработка алгоритмов корректировки замеренных значений расходов и давлений по 1-ому и 2-ому законам Кирхгофа, верификация их на основе данных натурных исследований на рудниках с разветвленными и протяженными сетями горных выработок.

3. Совершенствование метода определения аэродинамических сопротивлений на основе проведения предварительных экспериментальных исследований в шахтных стволах и верификация его на натурных измерениях.

4. Разработка алгоритма регулирования совместной работы нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.

5. Разработка научно-методических основ и программных средств для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции.

**Методы исследования** предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали: анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования по определению аэротермодинамических параметров воздуха и элементов вентиляционных сетей, статистическую обработку результатов экспериментальных измерений, математическое моделирование аэродинамических процессов в рудничной вентиляционной сети, анализ результатов численного моделирования и натурных экспериментов.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту:**

1. Автоматизированный способ обработки экспериментальных данных, основанный на корректировке значений расходов воздуха и давлений по 1-ому и 2-ому законам Кирхгофа, позволяет установить достоверные аэродинамические параметры вентиляционных систем рудников с учетом динамики воздушных потоков независимо от сложности вентиляционных сетей.

2. Экспериментально-аналитический метод определения закономерностей течения воздушных потоков в шахтных стволах, учитывающий границы участков проведения замеров, физические процессы в стволах и факторы, влияющие на точность измерений в пределах участка ствола, позволяет рассчитывать величину аэродинамического сопротивления шахтных стволов произвольного типа.
3. Способ оптимизации режимов совместной работы нескольких источников тяги и вентиляционных сооружений, заключающийся в выявлении и учете зон их аэродинамического влияния, позволяет определять эффективные режимы работы каждого из источников тяги по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.

#### **Научная новизна:**

1. Разработан способ автоматизированной обработки данных натурных измерений для создания детализированных математических моделей вентиляционных сетей, используемых для повышения точности прогнозирования воздухораспределения.
2. Обоснован экспериментально-аналитический метод расчета аэродинамических сопротивлений шахтных стволов, который позволяет определить положения границ участков проведения измерений и учитывает изменения аэро- и термодинамических параметров воздуха по всей длине исследуемой части ствола.
3. Предложен и реализован алгоритм регулирования совместной работы нескольких источников тяги и вентиляционных сооружений для автоматизированного проектирования энергоэффективных систем проветривания рудников.
4. Разработаны методические основы и программные средства для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными вентиляционными системами.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается значительным объемом экспериментальных исследований, проведенных в шахтных условиях, и положительными результатами верификации данных, полученных на основании численного моделирования. Результаты моделирования воздухораспределения проверялись в рамках проводимых натурных исследований (воздушно-депрессионных съемок) на рудниках ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

**Практическое значение и реализация результатов работы** состоит в использовании разработанных методик создания корректных математических

моделей для решения вентиляционных задач и алгоритма оптимизации параметров сложных систем рудничной вентиляции для минимизации их суммарной потребляемой мощности. Предложенные алгоритмы реализованы в составе аналитического комплекса «АэроСеть», используемого при создании математических моделей и дальнейшей разработке технических решений по повышению эффективности проветривания рудников ПАО «Уралкалий», ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», ОАО «Беларуськалий», АО «Апатит», ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат».

### **Связь работы с крупными научными программами и темами**

Диссертационная работа выполнена в соответствии с планами научных исследований «ГИ УрО РАН» по темам «Разработка теоретических основ и практических методов интеллектуального мониторинга сложных горнотехнических объектов» (РНФ, № гос. регистрации 19-77-30008), «Исследование влияния фазовых переходов атмосферной влаги на формирование комфортных условий ведения горных работ» (РФФИ, № гос. регистрации 115022410087) и «Разработка методов прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания горнодобывающих предприятий» (РФФИ, № гос. регистрации АААА-А17-117061510015-6), а также с тематикой хоздоговорных работ с горными предприятиями ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», ОАО «Беларуськалий», АО «Апатит» и проектными институтами ООО «Институт Гипроникель», АО «ВНИИ Галургия».

### **Апробация работы**

Научные положения и основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийском молодежном форуме «Нефтегазовое и горное дело» (Пермь, ПНИПУ, 2012 г.), на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, Горный институт НИТУ МИСиС, 2013, 2015, 2016 и 2018 гг.), на международной научно-практической конференции «Горная и нефтяная электромеханика: проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного оборудования» (Пермь, ПНИПУ, 2014 и 2015 гг.), на всероссийской молодежной научно-практической конференции «Проблемы недропользования» (Апатиты, Горный институт КНЦ РАН, 2016 гг.), на III-ей и IV-ой международных научно-практических конференциях «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке» (Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский горный университет, 2016 и 2018 гг.) а также на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» «Стратегия и процессы освоения георесурсов» (Пермь, «ГИ УрО РАН», 2013-2018 гг.).

## **Личный вклад автора**

При непосредственном участии автора проведена постановка задач, разработка математических моделей, экспериментальные исследования в шахтных условиях, анализ и обработка полученных данных, теоретические исследования и создание программных продуктов, выполнение расчетов и проведение численных экспериментов, разработка научных решений и их практическая реализация, сформулированы научные положения и выводы.

Практические эксперименты и внедрение результатов исследований были бы невозможны без содействия ведущих специалистов горных предприятий: заместителя главного инженера по ПВС рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» Пехоты С.Н., главного горняка ООО «ЕвроХим – Усольский калийный комбинат» Окулова Е.А. и других.

Автор выражает глубокую благодарность своему научному руководителю д.т.н., проф. Казакову Б.П. за помощь в формировании научного направления диссертационной работы, д.т.н. Левину Л.Ю. за ценные указания, Казаковой Л.В. за консультации и ценные указания, д.т.н. Зайцеву А.В. за помощь в выполнении работы, д.т.н. Шалимову А.В. за ценные указания и к.т.н. Семинову М.А. за помощь в разработке алгоритмов. Успешной работе над диссертацией способствовала творческая, доброжелательная атмосфера в коллективе и поддержка семьи.

## **Публикации**

По теме диссертационной работы опубликованы 15 печатных работ, в том числе 6 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, получен 1 патент на изобретение.

## **Объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков и 18 таблиц. Список использованных источников состоит из 110 наименований, в том числе 17 зарубежных.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В условиях рудников со сложными системами вентиляции повышение эффективности проветривания является важнейшей задачей рудничной аэрологии для обеспечения безопасности труда горнорабочих и снижения энергозатрат на проветривание. В основу решения задачи входит разработка математической

модели вентиляционной сети на основании проведенных натурных исследований в условиях рудников и дальнейшей оптимизации параметров систем рудничной вентиляции по критерию минимизации потребляемой мощности.

### **1 научное положение:**

*Автоматизированный способ обработки экспериментальных данных, основанный на корректировке значений расходов воздуха и давлений по 1-ому и 2-ому законам Кирхгофа, позволяет установить достоверные аэродинамические параметры вентиляционных систем рудников с учетом динамики воздушных потоков независимо от сложности вентиляционных сетей.*

Исследование аэрологических процессов и создание детализированных математических моделей рудников основаны на автоматизированной корректировке экспериментально замеренных значений количества воздуха и давлений в соответствии с 1-ым и 2-ым законами Кирхгофа, а также последующим расчетом аэродинамических сопротивлений горных выработок независимо от сложности топологии вентиляционных сетей. Корректировка экспериментальных значений измерений необходима по причине нестационарного характера воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях.

Для увязывания давлений и расходов воздуха с помощью алгоритма в математическую модель вносятся следующие исходные данные: проектные длины и сечения горных выработок; проектные коэффициенты аэродинамического сопротивления; давления и расходы воздуха, замеренные экспериментально на основных участках вентиляционной сети; аэродинамические параметры вентиляционных сооружений и источников тяги, замеренные экспериментально.

В связи с тем, что точность измерения расходов выше точности измерения давлений, обработка данных начинается с автоматического увязывания расходов воздуха с соблюдением 1-го закона Кирхгофа. Для решения задачи распределения расходов воздуха в сети разработан алгоритм:

1. На первом этапе осуществляется разделение вентиляционной сети на подсети.
2. Вторым этапом характеризуется расчетом стационарного воздухораспределения для каждой подсети  $Q = \{Q_1, \dots, Q_N\}$ .
3. На третьем этапе определяется невязка воздуха между подсетями.
4. В рамках четвертого этапа производится корректировка балансов расходов воздуха в подсетях.

Этапы (2-4) повторяются до тех пор, пока не распределится невязка между подсетями ( $\varepsilon_Q < \varepsilon_{Q0}$ ). Как только невязка расходов воздуха между подсетями распределится, получим подробное распределение расходов в модели вентиляционной сети.

Для решения задачи распределения давлений в сети разработан алгоритм, позволяющий автоматически увязывать все замеренные значения давлений:

1. На первом этапе все узлы с замеренными значениями давлений объединяются во множество  $V_{ЗАМ}$ , а узлы, в которых отсутствуют значения — во множество  $V_{КОРР}$ .
2. Второй этап характеризуется пересчетом давлений в каждом узле из множества  $V_{КОРР}$ .

Пересчет давлений производится на каждом шаге итерационной процедуры в каждом узле №  $i$  из множества  $V_{КОРР}$  (до тех пор, пока  $\varepsilon_p < \varepsilon_{p0}$ ) по формуле:

$$p_i^{new} = p_i(1-2s) + 2s \cdot \langle p \rangle, \quad (1)$$

где  $s < 0.5$  — параметр усреднения давления, аналогичный по смыслу параметру дискретизации при решении диффузионного уравнения методом конечных разностей;  $\langle p \rangle$  — среднее значение давлений в смежных с узлом №  $i$  узлах.

В случае если в узел №  $i$  входит единственная выработка и выходит единственная выработка, выражение для  $\langle p \rangle$  имеет вид

$$\langle p \rangle = \frac{\frac{p_{in} + p_{out}}{D_{in}} + \frac{D_{out}}{1}}{\frac{1}{D_{in}} + \frac{1}{D_{out}}}, \quad (2)$$

где  $p_{in}$  — давление в смежном узле со стороны входящей в узел №  $i$  выработки;  $p_{out}$  — давление в смежном узле со стороны исходящей из узла №  $i$  выработки;  $D_{in} = R_{in}Q_{in}^2$  — модельная депрессия во входящей выработке, рассчитанная на основании результатов увязывания расходов;  $D_{out} = R_{out}Q_{out}^2$  — модельная депрессия в исходящей выработке, рассчитанная на основании результатов увязывания расходов.

В общем случае произвольного количества входящих в узел №  $i$  и исходящих из него выработок, а также наличия источников тяги, выражение для  $\langle p \rangle$  имеет вид

$$\langle p \rangle = \frac{\sum \frac{p_i - H_j}{D_j}}{\sum \frac{1}{D_j}}, \quad (3)$$

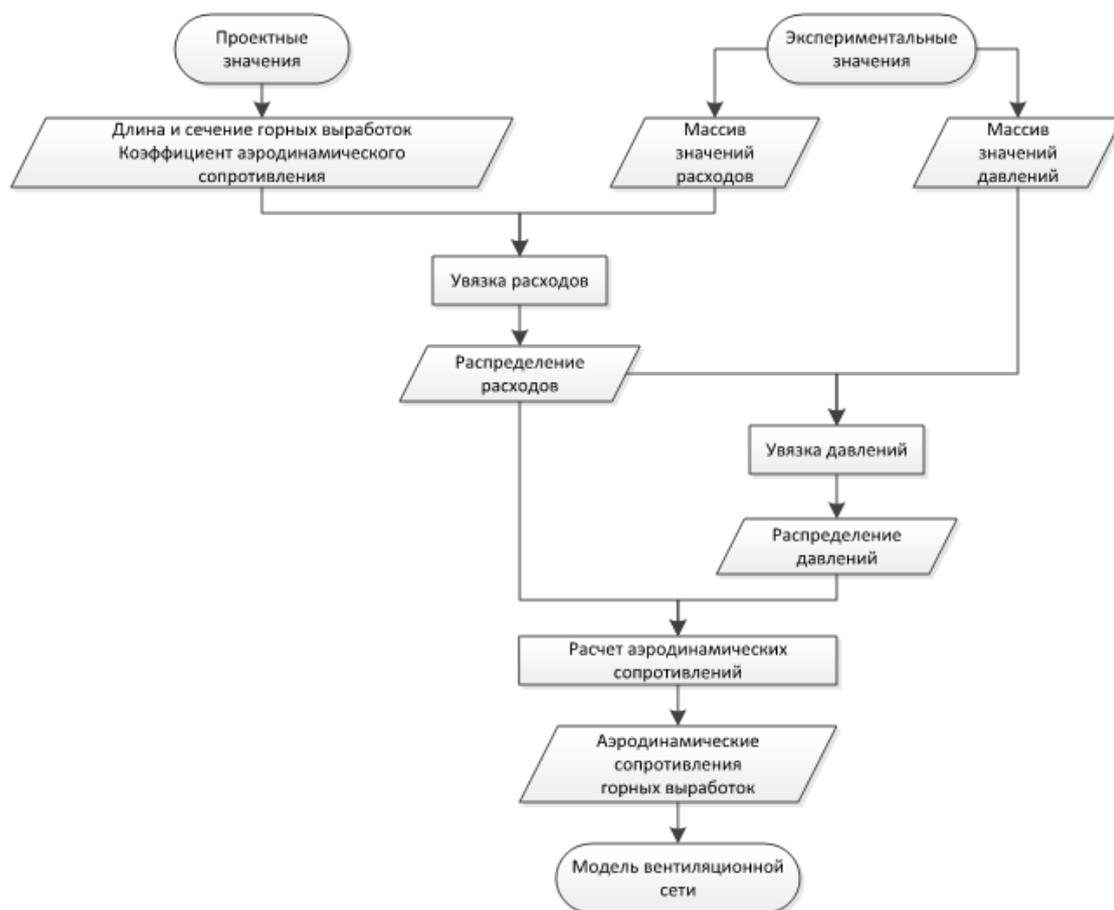
где  $H_j$  — источник тяги в выработке №  $j$ , инцидентной узлу №  $i$ , а суммирование осуществляется по всем входящим и исходящим из узла №  $i$  выработкам.

Далее на основании увязанных давлений и расходов воздуха производится расчет действительных аэродинамических сопротивлений всех горных выработок в вентиляционной сети

$$R_j = \frac{\Delta p_j}{Q_j^2}. \quad (4)$$

На рисунке 1 представлена схема алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки.

Алгоритм автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки разработан для унификации и автоматизации процессов увязывания замеренных расходов воздуха и давлений и реализован на базе аналитического комплекса «АэроСеть».



**Рисунок 1** — Схема алгоритма автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки

Разработанный алгоритм верифицирован. Для доказательства достоверности результатов проведено сопоставление результатов численного моделирования и натуральных экспериментов. Данные для сравнения получены на основании проведенной воздушно-депресссионной съемки рудника «Октябрьский»

ПАО ЗФ «ГМК «Норильский Никель», обладающего всеми элементами сложной топологии.

## **II научное положение:**

*Экспериментально-аналитический метод определения закономерностей течения воздушных потоков в шахтных стволах, учитывающий границы участков проведения замеров, физические процессы в стволах и факторы, влияющие на точность измерений в пределах участка ствола, позволяет рассчитывать величину аэродинамического сопротивления шахтных стволов произвольного типа.*

Основные потери давления приходятся на стволы - до 70 % депрессии ГВУ, поэтому повышение точности определения их аэродинамических сопротивлений является приоритетной задачей для увеличения точности построения математических моделей вентиляционных сетей.

В основу экспериментально-аналитического метода по определению аэродинамических сопротивлений шахтных стволов входят:

- проведение предварительных измерений;
- моделирование изменения аэро- и термодинамических процессов в стволе;
- проведение основных измерений;
- статистическая обработка замеренных параметров воздуха;
- вычисление аэродинамического сопротивления шахтных стволов.

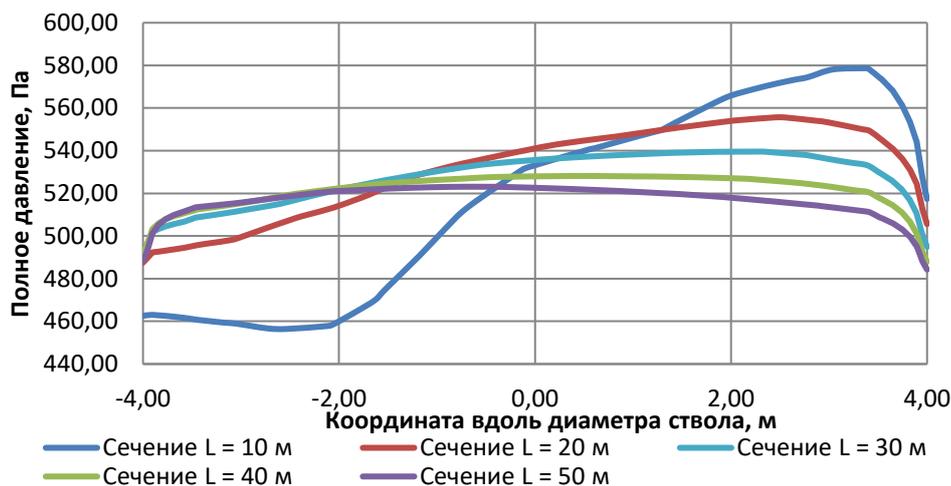
При проведении экспериментальных исследований в пределах стволов выявлены участки, на которых проведение замеров нецелесообразно ввиду повышенной погрешности измерений. Эти участки относятся к местам сопряжений стволов с вентиляционными каналами и горными выработками горизонтов.

Поэтому в данной работе прежде всего решалась задача определения границ участков проведения замеров. Далее в пределах полученных участков исследовалось влияние физических процессов в стволах, рассматривались факторы, влияющие на точность определения аэродинамического сопротивления глубоких шахтных стволов.

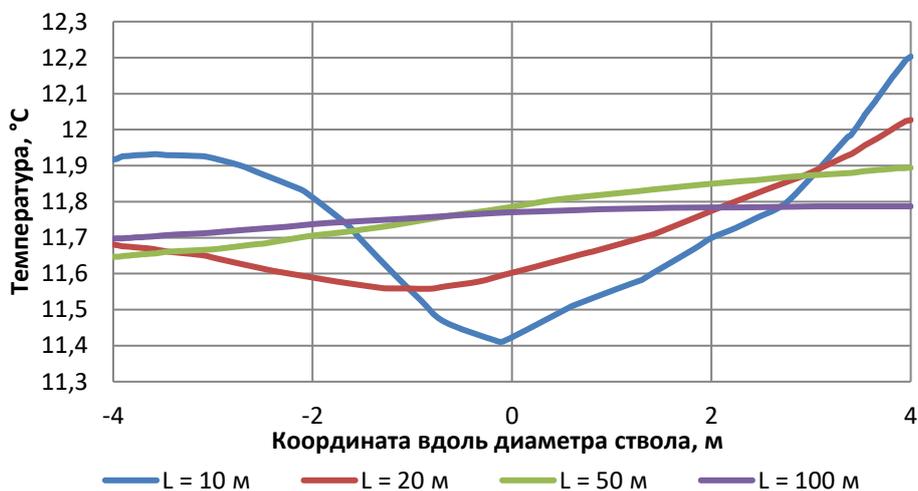
Решение задачи по определению границ замерных участков стволов осуществлялось на основании численного моделирования смешивания и разделения воздушных потоков на различных участках стволов: сопряжение «ствол — калориферный канал» и сопряжение «ствол — горизонт»; сопряжение «ствол — горизонт» и сопряжение «ствол — вентиляционный канал». Исходными данными для проведения численного моделирования являлись результаты проведенных предварительных экспериментальных исследований в условиях рудников «Октябрьский» и «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель».

Расчетная трехмерная модель включает в себя геометрию ствола с прилегающими к нему калориферным каналом и участком горизонта с учетом их геометрических параметров — длин  $L_i$  (м) и площадей поперечного сечения  $S_i$  (м<sup>2</sup>). На участке входа потока в расчетную область (калориферный канал и надшахтное здание) задавались расход  $Q_i$  (м<sup>3</sup>/с) и температура  $T_i$  (°C) воздушного потока.

По результатам моделирования определены распределения давлений (рис. 2) и температур (рис. 3) воздуха в поперечных сечениях ствола ( $D=8$  м) на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения калориферного канала и ствола.



**Рисунок 2** — Распределение давления воздуха в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения калориферного канала и ствола



**Рисунок 3** — Распределение температуры воздуха в поперечных сечениях ствола на различных расстояниях  $L$  (м) от сопряжения калориферного канала и ствола

На основании полученных результатов моделирования (поля давлений и температур) можно сделать вывод, что выравнивание температуры воздуха после смешивания воздушных потоков по сечению ствола происходит значительно медленнее (100 м), чем выравнивание давления (50 м). Следовательно, основным

критерием при определении протяженности участка, на котором происходит смешивание воздушных потоков, является температура воздуха.

Положение конечной точки исследуемого участка ствола определено по результатам численного моделирования разделения воздушных потоков на участке ствола и сопряжения с горизонтом. Она расположена непосредственно перед сопряжением ствола с горизонтом.

По результатам численного моделирования участков вентиляционного ствола (сопряжение «ствол — горизонт» и сопряжение «ствол — вентиляционный канал») можно сделать аналогичные выводы — выравнивание температуры воздуха после смешивания воздушных потоков по сечению ствола происходит через 100 м, а выравнивание давления — через 50 м. Конечная точка исследуемого участка расположена непосредственно перед сопряжением ствола с вентиляционным каналом.

Проведенные численные расчеты позволяют точно определить границы исследуемого участка шахтного ствола.

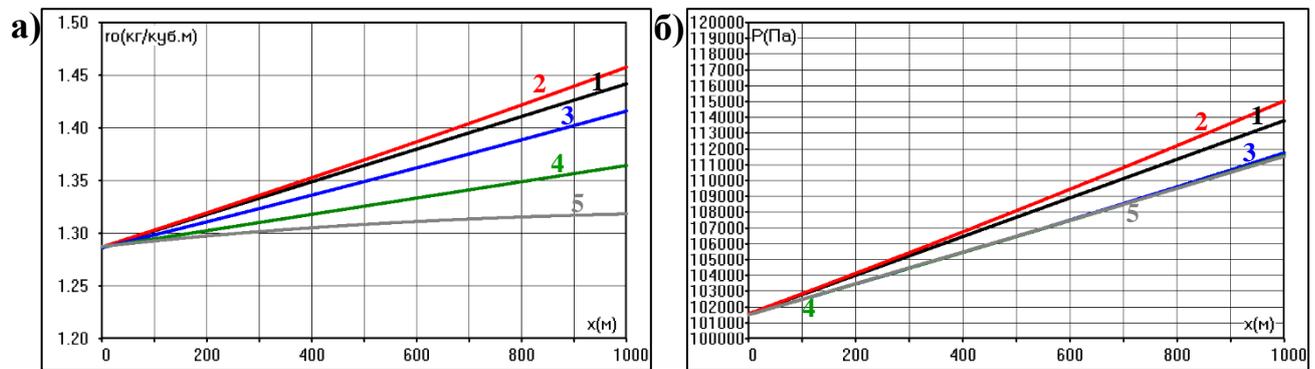
Исследование влияния физических процессов проведено на модели ствола. При проведении расчетов учитывались следующие физические процессы: гравитационное сжатие, депрессионное разрежение, гидростатический разогрев и теплообмен воздуха с крепью.

Величина аэродинамического сопротивления измеряемых участков стволов определяется из уравнения:

$$\Delta R_j = \Delta R_j(v_j, S_j, P_i, \rho_i, \Delta h_j), \quad (5)$$

где  $v_j$  — скорость движения воздуха в  $j$ -той выработке, м/с;  $S_j$  — площадь поперечного сечения  $j$ -той выработки, м<sup>2</sup>;  $P_i$  — абсолютное давление, замеренное в точке  $i$ , Па;  $\rho_i$  — плотность воздуха, определенная в точке  $i$ , кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta h_j$  — длина участка, м.

В связи с тем, что на исследуемом участке ствола определяются давление  $P_i$  и плотность  $\rho_i$ , определяется их реальное изменение на протяжении всего участка. Плотность воздуха меняется под действием следующих факторов: сжатие воздуха под действием собственного веса; разрежение воздуха за счет источников тяги; температурное изменение плотности в результате теплообмена с крепью, гидростатическое сжатие воздуха. Решение задачи осуществляется на основании численного моделирования в аналитическом комплексе «АэроСеть».



**Рисунок 4** — Расчетные значения:

а — изменения плотности воздуха по глубине воздухоподающего ствола с учетом различных факторов, б — изменения абсолютного давления воздуха по глубине воздухоподающего ствола с учетом различных факторов: 1 — рассчитывается из предположения постоянства плотности воздуха; 2 — учитывается гравитационное сжатие воздуха; 3 — учитывается гравитационное сжатие и депрессионное разрежение воздуха; 4 — учитываются все предыдущие факторы и гидростатический разогрев воздуха; 5 — учитываются вышеперечисленные факторы и теплообмен воздуха с крепью ствола.

На рисунке 4а представлены расчетные результаты моделирования изменения плотности воздуха по глубине воздухоподающего ствола с учетом различных факторов. Влияние факторов на изменение плотности существенно и составляет согласно рисунку до 10 % плотности воздуха на километровой глубине. Отклонение от линейности всех графиков не превышает 1 % от плотности воздуха на 1000 метров. Аналогичный вывод можно сделать и относительно поля абсолютных давлений по глубине ствола (рис. 4б). Нелинейность графиков выражена еще слабее. Уточнять параметры не имеет смысла.

Для определения перепада давлений выбран барометрический способ. Основными достоинствами предложенного способа в сравнении с манометрическим являются:

- возможность проведения замеров за короткий промежуток времени в условиях нестационарного характера воздухораспределения;
- абсолютная погрешность измерений прибором ниже;
- возможность применения способа в стволах независимо от их оснащения подъемными сосудами.

С точки зрения проведения замеров изменение атмосферного давления воздуха и гидростатическое сжатие воздуха при опускании его на глубину оказывают влияние на точность определения аэродинамического сопротивления шахтных стволов. Поэтому при проведении и обработке замеров необходимо учитывать эти поправки.

С учетом определенных границ участка ствола и количества необходимых замеров на протяжении ствола уравнение (5) примет следующий вид:

$$\Delta R = \frac{P_1 - (P_2 \pm \Delta P_{Атм} - \rho_{ср} \cdot g \cdot L_{1-2})}{\left( \sum_{j=1}^n v_j \cdot S_j \right)^2}, \quad (6)$$

где  $P_1$  – абсолютное давление в начальной точке измеряемого участка ствола, Па;  $P_2$  – абсолютное давление в конечной точке измеряемого участка ствола, Па;  $\pm \Delta P_{Атм}$  – изменение атмосферного давления, Па (знак «+» – атмосферное давление возросло относительно первоначального значения, знак «-» – атмосферное давление снизилось относительно первоначального значения);  $\rho_{ср}$  – средняя плотность воздуха на участке ствола «1-2», кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $L$  – протяженность исследуемого участка ствола, м.

Полученные результаты использованы при разработке экспериментально-аналитического метода исследования аэродинамических сопротивлений шахтных стволов для повышения точности построения математических моделей вентиляционных сетей.

### **III научное положение:**

*Способ оптимизации режимов совместной работы нескольких источников тяги и вентиляционных сооружений, заключающийся в выявлении и учете зон их аэродинамического влияния, позволяет определять эффективные режимы работы каждого из источников тяги по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.*

Разработан способ оптимизации параметров каждого из одновременно работающих нескольких главных вентиляторных установок (ГВУ) и вентиляционных сооружений для проектирования энергоэффективных систем рудничной вентиляции. Этот способ позволяет рационально перераспределять воздух между рабочими зонами вентиляционной сети рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности ГВУ.

Исходными данными для решения задачи оптимизации параметров одновременно работающих главных вентиляторных установок являются: математическая модель вентиляционной сети, расчет требуемого количества воздуха, начальные параметры источников тяги и вентиляционных сооружений.

Решение поставленной задачи производится в два этапа:

- определение степени влияния каждой ГВУ и каждого вентиляционного сооружения на проветривание каждого из участков вентиляционной сети;
- регулирование воздухораспределения в вентиляционной сети путем совместной оптимизации параметров главных вентиляторных установок и

вентиляционных сооружений с целью минимизации суммарной потребляемой мощности.

Для определения степени влияния главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений на проветривание участков вентиляционной сети рудников со сложными системами вентиляции введено понятие матрицы влияния  $I$ , элемент которой  $I_{jm}$  определяется по формуле:

$$I_{jm(n)} = \frac{\Delta Q_{jm(n)}}{\Delta Q_{m(n)}}, \quad (7)$$

где  $\Delta Q_{jm(n)}$  — изменение (отклик) количества воздуха в  $j$ -той выработке при малой вариации производительности  $m$ -ой ГВУ (расхода  $n$ -ого вентиляционного сооружения);  $\Delta Q_{m(n)}$  — вариация производительности  $m$ -ой ГВУ (расхода  $n$ -ым вентиляционным сооружением).

Далее матрица влияния  $I$  использована для разработки способа оптимизации параметров вентиляционных сооружений и режимов работы нескольких главных вентиляторных установок в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности, а также для определения степени влияния каждого вентиляционного сооружения и каждой главной вентиляторной установки на сеть горных выработок.

При разработке способа оптимизации параметров одновременно работающих ГВУ получены следующие правила:

- если есть рабочая зона вентиляционной сети, в которой расход меньше требуемого, то хотя бы одна ГВУ увеличивает частоту вращения;
- если в рабочей зоне вентиляционной сети выявлен перерасход воздуха, то хотя бы одна ГВУ снижает частоту вращения;
- увеличивать подачу воздуха следует за счет повышения частоты вращения рабочего колеса ГВУ с наименьшей потребляемой мощностью;
- уменьшать подачу воздуха следует за счет понижения частоты вращения рабочего колеса ГВУ с наибольшей потребляемой мощностью;
- корректировать расход воздуха в рабочей зоне вентиляционной сети следует за счет ГВУ, в наибольшей степени влияющей на расход в этой рабочей зоне.

Следуя этим правилам, уравнение регулирования режима работы каждой из главных вентиляторных установок примет следующий вид:

$$\Delta n_m = A \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2}{N_{ГВУ} \cdot n_m^2} \cdot I_{jm(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{ГВУ} \cdot n_m^2}{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2} \cdot I_{jm(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right), \quad (8)$$

где  $A$  — коэффициент интенсивности;  $n_m$  — частота вращения рабочего колеса  $m$ -ой главной вентиляторной установки;  $N_{ГВУ}$  — количество главных вентиляторных установок;  $I_{jm}$  — матрица влияния, характеризующая влияние производительности  $m$ -ой ГВУ на величину расхода воздуха в каждой  $j$ -той выработке;  $\Delta Q_j$  — ошибка управления расходами (отклонение фактических расходов от требуемых).

Для повышения эффективности перераспределения воздуха между рабочими зонами рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности главных вентиляторных установок необходимо помимо регулирования частоты вращения рабочего колеса использовать средства отрицательного регулирования.

При разработке способа оптимизации параметров вентиляционных сооружений получены следующие правила:

- если есть рабочая зона, в которой расход воздуха меньше требуемого, а все вентиляционные сооружения закрыты, то необходимо начинать открывание вентиляционных сооружений, влияющих на данную рабочую зону;
- если в рабочей зоне выявлен перерасход воздуха, то для ограничения его количества необходимо устанавливать вентиляционные сооружения, влияющие на данную рабочую зону;
- корректировать расход воздуха в рабочей зоне вентиляционной сети следует за счет вентиляционных сооружений, в наибольшей степени влияющих на расход в этой рабочей зоне.

Следуя этим правилам, уравнение регулирования воздухораспределения с помощью вентиляционных сооружений примет следующий вид:

$$\Delta S_n = B \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2}{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2} \cdot I_{jn(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2}{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2} \cdot I_{jn(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right), \quad (9)$$

где  $B$  — интенсивность регулирования;  $R_n$  — аэродинамическое сопротивление  $n$ -ого средства отрицательного регулирования;  $Q_n$  — расход воздуха, проходящего через  $n$ -ое вентиляционное сооружение;  $N_{COP}$  — количество средств отрицательного регулирования;  $I_{jn}$  — матрица влияния, характеризующая влияние установки  $n$ -ого вентиляционного сооружения на величину расхода в каждой  $j$ -той выработке;  $\Delta Q_j$  — отклонение фактических расходов от требуемых.

Совместный способ регулирования воздухораспределения состоит из оптимизации положения вентиляционных сооружений (9) и режимов одновременной работы главных вентиляторных установок (8) в вентиляционных сетях рудников.

Подбор оптимальных параметров по критерию суммарной минимальной потребляемой мощности производится для ГВУ (путем регулирования частоты вращения рабочего колеса) и вентиляционных сооружений (путем регулирования площади поперечного сечения вентиляционных окон)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta n_m = A \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2}{N_{ГВУ} \cdot n_m^2} \cdot I_{jm(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{ГВУ} \cdot n_m^2}{\sum_{k=1}^{N_{ГВУ}} n_k^2} \cdot I_{jm(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right) - C \cdot \min_j \Delta S_j \\ \Delta S_n = B \cdot \left( \frac{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2}{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2} \cdot I_{jm(деф.)} \cdot \max_j \Delta Q_j^+ - \frac{N_{COP} \cdot R_n \cdot Q_n^2}{\sum_{k=1}^{N_{COP}} R_k \cdot Q_k^2} \cdot I_{jm(зан.)} \cdot \min_j \Delta Q_j^- \right) \end{array} \right. \quad (10)$$

Разработанный алгоритм апробирован для оптимизации параметров работы ГВУ и вентиляционных сооружений на руднике «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский Никель» и руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий». Проведены расчеты по повышению энергоэффективности проветривания рудника.

Результаты расчетов двух режимов работы ГВУ на рассматриваемых рудниках представлены в таблицах 1 и 2: режим 1 — существующий; режим 2 — предлагаемый (рассчитывается с учетом использования разработанных алгоритмов для повышения эффективности проветривания).

**Таблица 1 — Результаты расчета, существующего и предлагаемого режимов проветривания для рудника «Октябрьский»**

Параметры	Существующий режим	Предлагаемый режим
Расчетное количество воздуха необходимого для проветривания рудника, м <sup>3</sup> /мин	78300	
Фактическое (модельное) количество воздуха, подаваемого в рудник, м <sup>3</sup> /мин	82302	82338
Суммарная потребляемая мощность ГВУ, кВт	5764	4974

Полученные результаты расчетов указывают на возможность снижения суммарной потребляемой мощности четырех главных вентиляторных установок для рудника «Октябрьский» ПАО «ГМК «Норильский Никель» на 6,9 млн кВт\*час/год.

Также по результатам проведенной воздушно-депресссионной съемки на руднике 4 РУ ОАО «Беларуськалий» проведено моделирование в АК «АэроСеть» для оптимизации параметров работы существующих главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений.

**Таблица 2 — Результаты расчета существующего и предлагаемого режимов проветривания для рудника 4 РУ**

<b>Параметры</b>	<b>Существующий режим</b>	<b>Предлагаемый режим</b>
Расчетное количество воздуха необходимого для проветривания рудника, м <sup>3</sup> /мин	27585	
Фактическое (модельное) количество воздуха, подаваемого в рудник, м <sup>3</sup> /мин	33618	28615
Суммарная потребляемая мощность ГВУ, кВт	1720	1351

Результаты расчетов указывают на возможность снижения суммарной потребляемой мощности главных вентиляторных установок для рудника 4 РУ ОАО «Беларуськалий» на 3,2 млн кВт\*час/год.

Использование разработанных способов повышения эффективности проветривания рудников позволит своевременно определять оптимальные режимы совместной работы главных вентиляторных установок при изменении глубины отрабатываемых запасов, топологии горных выработок и количества потребителей.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе представлено решение научно-практической задачи разработки способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции на основе многовариантного численного моделирования аэродинамических процессов и создания способа совместной оптимизации параметров систем рудничной вентиляции с целью использования его для разработки энергосберегающих решений. При этом получены следующие основные научные результаты:

1. Автоматизирован процесс обработки данных воздушно-депресссионной съемки путем разработки и реализации алгоритмов автоматического увязывания расходов воздуха и давлений в программно-вычислительном комплексе.

2. Разработан и верифицирован алгоритм автоматизированной обработки результатов измерений воздушно-депресссионной съемки, проведенной в руднике «Октябрьский».
3. На основании проведенных теоретических исследований и результатов анализа экспериментальных данных усовершенствован и верифицирован метод проведения экспериментальных исследований для определения реальных аэродинамических сопротивлений шахтных стволов.
4. Разработан алгоритм оптимизации параметров каждого из совместно работающих нескольких главных вентиляторных установок и вентиляционных сооружений в вентиляционных сетях рудников по критерию минимизации суммарной потребляемой мощности.
5. Разработаны программно-методические средства для повышения энергоэффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции на основе использования усовершенствованных методов построения моделей вентиляционных сетей и метода оптимизации параметров главных вентиляторных установок.
6. Проведены экспериментальные исследования распределения аэродинамических и термодинамических параметров воздуха, а также факторов, влияющих на определение аэродинамических сопротивлений шахтных стволов рудников «Октябрьский» и «Таймырский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель», которые подтвердили достоверность усовершенствованного метода.
7. Произведено построение модели вентиляционной сети рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский Никель» с использованием способа автоматизированной обработки данных воздушно-депресссионной съемки и методики определения аэродинамических сопротивлений шахтных стволов. На основе этой модели с помощью алгоритма оптимизации параметров главных вентиляторных установок подобраны наиболее энергоэффективные режимы их работы.

## СПИСОК РАБОТ,

опубликованных автором по теме диссертации

*публикации в изданиях, утвержденные Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации*

1. Казаков Б.П. Особенности определения аэродинамических сопротивлений глубоких шахтных стволов / Б.П. Казаков, А.Г. Исаевич, С.В. Мальцев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2013. — № 12. — С. 164—168.

2. Казаков Б.П. Обоснование участков измерения аэродинамических параметров воздушного потока при определении аэродинамического сопротивления стволов / Б.П. Казаков, С.В. Мальцев, М.А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — МГГУ, 2015. — № S7. — С. 69 — 75.

3. Казаков Б.П. Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников / Б.П. Казаков, А.Г. Исаевич, С.В. Мальцев, М.А. Семин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — Екатеринбург, 2016, № 1. — С. 22—30.

4. Казаков Б.П. Разработка способа оптимизации параметров работы нескольких главных вентиляторных установок для проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников сложной топологии / Б.П. Казаков, С.В. Мальцев, М.А. Семин // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — Екатеринбург, 2017. — № 1. — С. 101 — 108.

5. Казаков Б.П. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников сложной топологии / Б.П. Казаков, С.В. Мальцев, М.А. Семин // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — НИТУ МИСиС, 2017. — № 4. — С. 51 — 58.

6. Казаков Б.П. Математическое моделирование проветривания панелей гипсовой шахты эжекторными установками / Б.П. Казаков, М.А. Семин, С.В. Мальцев // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2018. — №3. — С. 245—255.

### *патент на изобретение*

7. Патент № 157165 Российская Федерация. Устройство для непрерывного отбора газо-воздушной смеси за заданный промежуток времени / Лаптев В.Н., Исаевич А.Г., Норина Н.В., Южанин А.С., Дудина Е.Н., Ковин К.А., Мальцев С.В., Трушкова Н.А., Газизуллин Р.Р., Стариков А.Н.; заявитель и

патентообладатель «ГИ УрО РАН». — № 2015111928; заявл. 1.04.15; опубл. 30.10.15, Бюллетень № 32. — 7 с.

### *публикации в других изданиях*

8. Мальцев С.В. Определение аэродинамических параметров стволов глубоких рудников на основании данных воздушно-депресссионной съемки / С.В. Мальцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов — Пермь, 2013. — Выпуск №11. — С. 256—257.

9. Мальцев С.В. Исследование факторов, влияющих на измерение аэродинамического сопротивления стволов глубоких рудников / С.В. Мальцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов — Пермь, 2014. — Выпуск №12. — С. 269—271.

10. Исаевич А.Г. Современная вентиляция рудников: экономия без ущерба безопасности / А.Г. Исаевич, А.В. Зайцев, С.В. Мальцев // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. — Пермь, 2014. — С.131—137.

11. Мальцев С.В. Совершенствование методов построения моделей рудничных вентиляционных сетей сложной топологии на основе автоматизации обработки данных воздушно-депресссионных съемок / С.В. Мальцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов — Пермь, 2015. — Выпуск №13. — С. 277 — 280.

12. Мальцев С.В. Разработка методики проведения экспериментальных исследований по определению аэродинамических сопротивлений стволов глубоких рудников / Мальцев С.В., Казаков Б.П. // Актуальные проблемы повышения эффективности и безопасности эксплуатации горно-шахтного и нефтепромыслового оборудования. — Пермь, 2015. — С. 271 — 278.

13. Мальцев С.В. Определение оптимальных параметров систем рудничной вентиляции сложной топологии по критерию минимизации потребляемой мощности / С.В. Мальцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов — Пермь, 2016. — Выпуск №14. — С. 273 — 277.

14. Мальцев С.В. Повышение эффективности проветривания рудников сложной топологии / С.В. Мальцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов — Пермь, 2017. — Выпуск №15. — С. 301 — 305.

15. Мальцев С.В. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников со сложными системами вентиляции / С.В. Мальцев // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов — Пермь, 2018. — Выпуск №16. — С. 277 — 281.

---

Сдано в печать .....2019 г.  
Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ  
«ГИ УрО РАН»  
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а