

Колесов Евгений Викторович



**РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ КАПЕЛЬНОЙ ВЛАГОЙ В
ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СТВОЛАХ РУДНИКОВ**

Специальность 2.8.6

Геомеханика, разрушение горных пород,
рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2023

Диссертация подготовлена в «Горном институте Уральского отделения Российской академии наук» – филиале федерального государственного бюджетного учреждения науки Пермского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук («ГИ УрО РАН»).

Научный руководитель: **Семина Михаил Александрович**
доктор технических наук,
заведующий лабораторией математического
моделирования геотехнических процессов
«ГИ УрО РАН» (г. Пермь)

Официальные оппоненты: **Курилко Александр Сардокович**
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник лаборатории горной
теплофизики Института горного дела Севера
имени Н. В. Черского Сибирского отделения
Российской академии наук (г. Якутск)

Лискова Мария Юрьевна
кандидат технических наук,
доцент кафедры безопасности жизнедеятельности
ФГАОУ ВО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет»
(г. Пермь)

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Уральский государственный
горный университет»** (г. Екатеринбург)

Защита диссертации состоится «26» января 2024 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.201.02 при ПФИЦ УрО РАН по адресу: г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А. С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке «ГИ УрО РАН» и на сайте <https://permsc.ru>.

Автореферат разослан «___» _____ 2023 года

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направить в двух экземплярах не позднее, чем за 10 дней до защиты диссертации. В отзыве должны быть указаны фамилия, имя, отчество, должность, организация, почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты лица, представившего отзыв.

Отзывы необходимо отправлять по адресу: 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А.

Телефон/факс: +7 (342) 216-75-02

E-mail: lserg@mi-perm.ru

Ученый секретарь диссертационного совета
канд. техн. наук

Лобанов С. Ю.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Вентиляционные стволы являются важнейшими элементами систем вентиляции рудников, при этом они часто служат для организации технологических процессов спуска–подъёма людей, горной массы и различных материалов. Обеспечение безаварийной эксплуатации вентиляционных стволов в течение всего срока службы горного предприятия является необходимым условием безопасного и энергоэффективного ведения горных работ. В то же время из многочисленного объема экспериментальных данных и практических наблюдений за воздухораспределением в рудниках известны случаи нарушения проветривания вентиляционных стволов вследствие протекания в них нестационарных физических процессов, связанных с образованием и скоплением капельной влаги.

Эффект, связанный с избыточным накоплением капельной влаги в вентиляционном стволе вследствие конденсации воды из воздуха или наличия водопритоков через негерметичную крепь, известен на практике как эффект водяной пробки, или бланкет–эффект. Чрезмерное скопление капельной влаги в стволе создает дополнительное аэродинамическое сопротивление и затрудняет проветривание рудника, а в некоторых случаях может привести к возникновению существенной тяги, приводящей к увеличению депрессии главной вентиляторной установки вплоть до ее перехода в режим неустойчивой работы.

Теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов тепломассопереноса в подземных горных выработках, в том числе в вентиляционных стволах рудников, занималось большое количество ученых, начиная с середины XX века: О. А. Кремнев, А. Н. Щербань, А. Ф. Воропаев, И. Р. Венгеров, Ю. Д. Дядькин, С. Г. Гендлер, А. С. Курилко, Ю. В. Шувалов, Г. В. Дуганов, Б. П. Казаков, Л. Ю. Левин, А. В. Зайцев, А. В. Шалимов и другие. За рубежом вопросами тепломассопереноса в горных выработках и вентиляционных сетях рудников занимались М. J. McPherson, S. J. Hardcastle, С. Kocsis, S. J. Bluhm, L. Maskay и др.

В научной литературе изучались в основном стационарные и квазистационарные процессы тепломассопереноса в рудничной атмосфере и породном массиве. Исключением являются работы Ю. В. Круглова, в которых глубоко исследован вопрос нестационарных аэродинамических процессов, но без учета изменения полей температуры, а также работы С. Kocsis, в которых исследован интересный нестационарный эффект теплового маховика в шахтных стволах. Теоретические исследования особенностей возникновения водяной пробки в стволах до настоящего времени практически не проводились из–за сложности физики данного явления, в то время как нынешний уровень развития аппарата вычислительной гидрогазодинамики позволяет исследовать данный вопрос глубже, существенно развить применяемые сегодня упрощенные модели стационарных тепловых процессов. Успешное решение этой задачи во многом зависит и от корректной параметризации моделей

теплопереноса в стволах по экспериментальным данным. Этот вопрос также обходился стороной в представленных на сегодня научных исследованиях.

Исследование причин формирования и эволюции водяной пробки в вентиляционных стволах на корректных математических моделях теплопереноса является актуальной научной задачей рудничной вентиляции, решение которой позволит разработать способы управления капельной влагой, направленные на обеспечение устойчивого движения воздушных потоков в стволах и на уменьшение негативного влияния бланкет-эффекта на работу главной вентиляционной установки.

Цель работы

Разработка и обоснование способов управления капельной влагой, исключающих ее накопление в вентиляционных стволах рудников.

Основная идея работы

Применение модели нестационарного теплопереноса в воздухе как многофазной среде, учитывающей вертикальный градиент температурного поля, теплообмен с влажной крепью ствола, фазовые переходы воды, локальные водопритоки из закрепного пространства, дисперсный состав водяных капель, и установленных закономерностей возникновения и накопления капель воды в вентиляционных стволах для разработки способов управления капельной влагой.

Основные задачи работы

1. Разработать математическую модель аэротермодинамических процессов в вентиляционных стволах рудников с учетом вертикального температурного градиента, теплообмена с крепью ствола, фазовых переходов воды, водопритоков из закрепного пространства и дисперсного состава капельной влаги.
2. Провести экспериментальные исследования изменения аэротермодинамических параметров воздуха в вентиляционных стволах рудников в условиях нормального и реверсивного режимов проветривания и проанализировать закономерности протекания аэротермодинамических процессов в стволах и прилегающих к ним горных выработках.
3. Разработать метод настройки теплофизических параметров модели аэротермодинамических процессов в вентиляционном стволе по данным экспериментальных измерений в условиях перехода на реверсивный режим проветривания.
4. Исследовать условия и закономерности возникновения и накопления капельной влаги в вентиляционных стволах рудников, степень ее влияния на увеличение аэродинамического сопротивления вентиляционной сети и рабочую точку главной вентиляционной установки.
5. Разработать способы управления капельной влагой, позволяющих исключить ее накопление в вентиляционных стволах рудников.

Методы исследований предусматривали комплексный подход к решению поставленных задач и включали анализ и обобщение научного и практического опыта, натурные исследования нестационарных процессов тепломассопереноса в вентиляционных стволах и горных выработках околоствольных дворов, одномерное и трехмерное численное моделирование процессов тепломассопереноса, анализ результатов натурных и численных экспериментов.

Основные научные положения, выносимые на защиту

1. Трехмерная численная модель нестационарного тепломассопереноса в воздухе как многофазной среде, учитывающая вертикальный градиент температурного поля, теплообмен с влажной крепью ствола, локальные водопритоки в ствол и дисперсный состав водяных капель, параметризованная по данным экспериментальных измерений и позволяющая исследовать условия и закономерности накопления капельной влаги в вентиляционных стволах рудников.
2. Увеличение аэродинамического сопротивления вентиляционного ствола, обусловленное наличием в нем капельной влаги вследствие ее конденсации из исходящего воздуха или поступления воды из закрепного пространства, достигает максимального значения в диапазоне скоростей воздушного потока 5,3 – 9,9 м/с, определяемого местом расположения источника водопритоков в стволе и условием уравнивания силы тяжести капель и аэродинамического сопротивления со стороны поднимающегося воздушного потока.
3. Способы управления капельной влагой, учитывающие геометрические параметры вентиляционного ствола, изменение влагосодержания, скорость исходящей струи воздуха, местоположение источника и величины водопритоков в ствол, которые заключаются в реализации мероприятий по сокращению интенсивности поступающей в ствол воды и регулировании параметров системы вентиляции рудника и позволяют уменьшить аэродинамическое сопротивление водяной пробки и ее влияние на работу главной вентиляторной установки.

Научная новизна

- Разработана трехмерная численная модель нестационарного тепломассопереноса в воздухе как в многофазной среде, учитывающая вертикальный градиент температурного поля, теплообмен с влажной крепью ствола, локальные водопритоки в ствол и дисперсный состав водяных капель, позволяющая исследовать условия и закономерности накопления капельной влаги в вентиляционных стволах рудников.
- Разработан теоретико–экспериментальный метод определения эффективного коэффициента теплоотдачи крепи вентиляционного ствола, основанный на минимизации рассогласования данных моделирования и натурных измерений аэротермодинамических параметров воздушной струи и температуры крепи ствола в процессе планового реверсирования главной вентиляторной установки.

- Установлены величины избыточного давления в вентиляционном стволе, связанного с наличием в нем капельной влаги вследствие конденсации из влажного исходящего воздуха или водопритоков из закрепного пространства, в зависимости от времени, средней скорости воздушной струи в стволе, геометрических параметров ствола, дисперсного состава капельной влаги и местоположения и интенсивности источника водопритоков в ствол.
- Разработаны способы управления капельной влагой в вентиляционных стволах рудников, позволяющие исключить ее накопление и сократить ее влияние на работу главной вентиляторной установки путем уменьшения количества конденсирующейся влаги и интенсивности водопритоков в ствол, перераспределения воздушных потоков, обеспечивающего скорость движения воздушной струи в стволе вне опасного диапазона.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается соответствием фундаментальным физическим законам, сопоставимостью результатов аналитических, численных решений и натурных измерений, большим объемом экспериментальных исследований в шахтных условиях, положительными результатами верификации и валидации разработанных моделей.

Практическое значение и реализация результатов работы

Полученные в диссертационной работе теоретические результаты окажутся полезными при проектировании вентиляции вентиляционных стволов, выборе параметров работы главных вентиляторных установок для исключения возможности образования и скопления большого количества влаги в стволах.

Экспериментальные результаты работы окажутся полезными в плане совершенствования общей методологии построения и настройки параметров аэротермодинамических моделей вентиляционных сетей рудников произвольной топологии. Также результаты работы, связанные с определением коэффициента теплоотдачи вентиляционных стволов, будут полезными для проектирования реверсивных режимов проветривания рудников, определения безопасных и эффективных мероприятий по эвакуации персонала по стволам, через которые осуществляется подача воздуха при реверсировании воздушной струи.

Апробация работы

Научные положения и основные результаты исследований докладывались и обсуждались на ежегодных научных сессиях «ГИ УрО РАН» (Пермь, «ГИ УрО РАН», 2018, 2019, 2023 гг.), на международных научных симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, МГГУ, 2019, 2020 гг.), на «Зимней школе по механике сплошных сред» (Пермь, «ИМСС УрО РАН», 2021 г.).

Связь работы с крупными научными программами и темами

Исследования по теме диссертации поддержаны Российским фондом фундаментальных исследований в рамках выполнения двух проектов:

- проект № 19–35–90076 «Исследование закономерностей конвективного расслоения воздушных потоков в шахтных стволах и его влияния на интенсивность и устойчивость проветривания шахты»;
- проект № 19–15–50125 «Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников».

Диссертационная работа выполнена в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 годы в рамках проекта «Исследование и разработка систем контроля и управления термодинамическими, геомеханическими и аэрологическими процессами при строительстве и эксплуатации горных предприятий в сложных горнотехнических условиях» (рег. номер НИОКТР АААА–А19–119091690020–0), а также в соответствии с Программой фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2030 годы в рамках проекта «Комплексное моделирование геофизических, геомеханических и аэрологических процессов в горнотехнических системах» (рег. номер НИОКТР 122030100425–6).

Личный вклад автора

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

Автор выражает благодарность своему научному руководителю д-ру техн. наук Семину М. А. за ценные указания и помощь в разработке математических моделей, д-ру техн. наук Шалимову А. В. и д-ру техн. наук проф. Казакову Б. П. за консультации при выполнении работы, д-ру техн. наук, чл.-кор. РАН Левину Л. Ю. за создание уникальной среды для исследований.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликованы 6 печатных работ, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, в том числе 5 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки РФ.

Объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 149 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка и 12 таблиц. Список использованных источников состоит из 190 наименований, в том числе 102 зарубежных.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

I научное положение:

Трехмерная численная модель нестационарного теплопереноса в воздухе как многофазной среде, учитывающая вертикальный градиент температурного поля, теплообмен с влажной крешью ствола, локальные водопритоки в ствол и дисперсный состав водяных капель, параметризованная по данным экспериментальных измерений и позволяющая исследовать условия и закономерности накопления капельной влаги в вентиляционных стволах рудников.

Экспериментальные исследования нарушения вентиляции стволов сопряжены с рядом трудностей, главные из которых – сложность воссоздания условий начала и развития неустойчивой вентиляции в момент измерений, а также сложность выявления значимости различных физических процессов при анализе исследуемых явлений. Наиболее доступным способом изучения этой проблемы является вычислительный эксперимент. Описание турбулентного движения воздуха в стволах основано на решении основных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, осредненных по Рейнольдсу, а в случае наличия капельной влаги в работе применялся подход Лагранжа, при котором решаются уравнения движения вдоль траекторий отдельных капель по предварительно рассчитанным из балансовых уравнений параметрам несущего воздушного потока:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u_i u_j}) + P_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} [u_i (\rho E + p)] = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\lambda + \frac{c_p \mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_j} + u_i (\tau_{ij})_{eff} \right], \quad (3)$$

$$\frac{du_{ip}}{dt} = F_D (u_i - u_{ip}) + \frac{g_i (\rho_p - \rho)}{\rho_p}, \quad (4)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³; u_i – вектор осредненной по Рейнольдсу скорости воздуха, м/с; μ – молекулярная динамическая вязкость воздуха, Па·с; $R = -\rho \overline{u_i u_j}$ – тензор турбулентных напряжений Рейнольдса, Па; E – удельная полная энергия воздуха, Дж/кг; c_p – удельная изобарная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); μ_t – турбулентная динамическая вязкость воздуха, Па·с; $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ – эффективная динамическая вязкость, Па·с; Pr_t – турбулентное число Прандтля; $(\tau_{ij})_{eff} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right)$ – эффективный тензор напряжений; T – температура воздуха, °С; g_i – ускорение свободного падения, м/с²; $F_D (u_i - u_{ip})$ – сила лобового сопротивления единичной массы, Н/кг; $F_D = \frac{18\mu c_D Re}{\rho_p d_p^2 24}$;

r_{ip} – координата частицы, м; d_p – диаметр капли, м; C_D – безразмерный коэффициент сопротивления формы, учитывающий изменение формы капли; $Re = \frac{\rho d_p |u_i - u_{ip}|}{\mu}$ – число Рейнольдса; P_i – слагаемое, характеризующее обмен импульсами между каплями и воздушным потоком, Н/м³.

Система дополняется уравнениями состояния влажного воздуха:

$$\rho = \frac{29P - 0.11\varphi[479 + (11,52 + 1,62T)^2]}{8,314(T + 273)}, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{Pm}{611(0,622 + m) \exp\left(\frac{17,5T}{T + 241,5}\right)}, \quad (6)$$

$$P = P_0 + \rho_0 g x, \quad (7)$$

где $m = m(x)$ – влагосодержание воздуха, кг/кг; P – барометрическое давление воздуха, Па.

Перенос тепла в крепи ствола и окружающем ствол породном массиве описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial T_m(t, r, x)}{\partial t} = a_m \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_m(t, r, x)}{\partial r} \right), \quad (8)$$

где $T_m(t, r, x)$ – температура крепи ствола и массива, °С; $a_m = a_m(x)$ – эффективный коэффициент теплопроводности системы «крепь-массив».

На контуре ствола задается граничное условие согласно закону Ньютона-Рихмана:

$$\lambda \frac{\partial T_m}{\partial r} \Big|_{r \rightarrow D/2} = \alpha(T - T_m) \Big|_{r \rightarrow D/2}, \quad (9)$$

где $\alpha = k(x) \cdot 3,6 \cdot \frac{u^{0,8}}{D^{0,2}}$ – эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·°С); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С); D – диаметр ствола, м.

Для решения системы уравнений требуется настройка модели, включающая построение расчетной области, выбор модели турбулентности, исследование сеточной сходимости. Также необходимо задать начальные и граничные условия и теплофизические параметры среды, для чего необходимо проведение экспериментальных исследований.

При разработке расчетной модели вентиляционного ствола построена расчетная область, учитывающая все его геометрические особенности, для дискретизации которой применялся метод контрольных объемов (рис. 1). Для расчета турбулентных течений применялась модель SST $k-\omega$, при этом сеточная сходимость достигалась при среднем размере элемента 30 см и временном шаге 0,25 с.

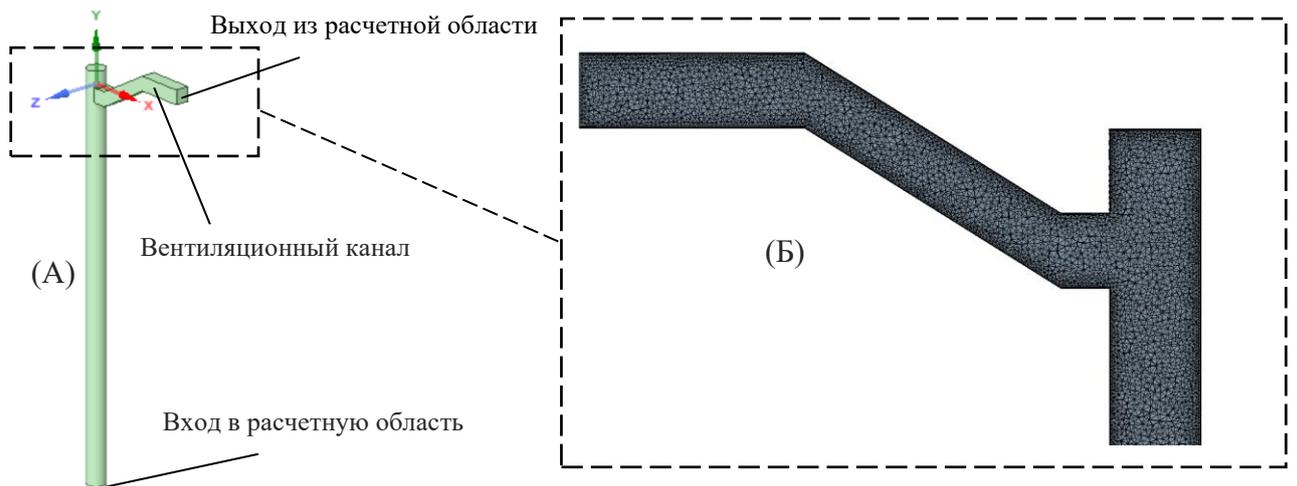


Рисунок 1 — (А) Общий вид расчетной области; (Б) срединный продольный срез участка расчетной области, разбитой на контрольные объемы

С целью параметризации разработанной расчетной модели проведены экспериментальные исследования параметров воздушного потока как в нормальном, так и в реверсивном режимах проветривания рудников. В нормальном режиме проветривания исследования проводились в стволе ВС-7 рудника Таймырский при поднятии на клетки и остановками для выполнения измерений. Результаты исследований приведены на рис. 2. Обнаружено, что при движении воздуха вверх по стволу происходит постепенная конденсация влаги в виде тумана и перехода тумана в крупные капли воды, препятствующие движению воздуха и создающие условия для возникновения бланкет-эффекта. Полученные данные использовались для параметризации математической модели бланкет-эффекта.

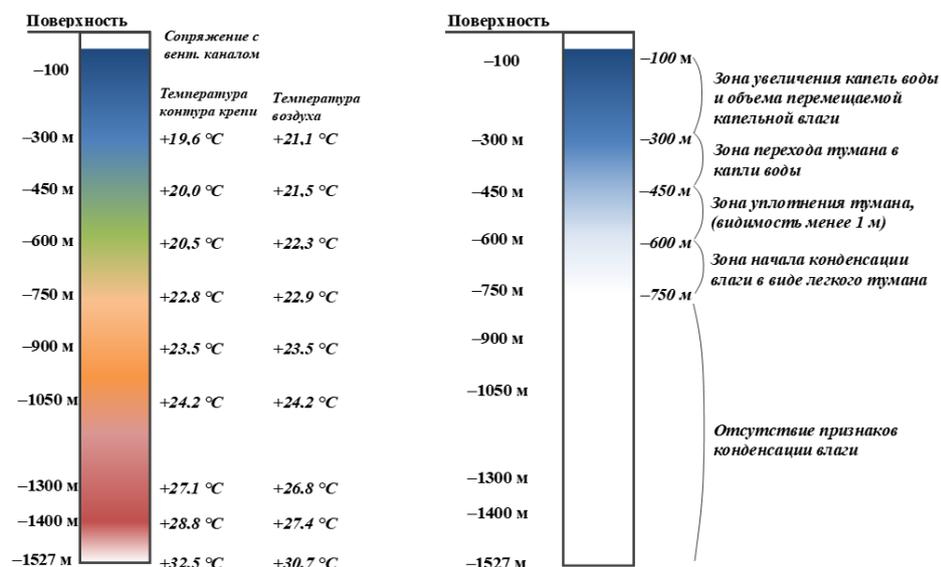


Рисунок 2 — Результаты экспериментальных исследований в вентиляционном стволе ВС-7 рудника Таймырский в нормальном режиме проветривания

Экспериментальные исследования в реверсивном режиме проветривания проводились в стволе ВС-9 рудника Скалистый в холодное время года, при этом в течение реверса

производились периодические измерения температуры крепи, температуры и влажности воздуха в вентиляционном канале и на сопряжениях с горизонтами (рис. 3).

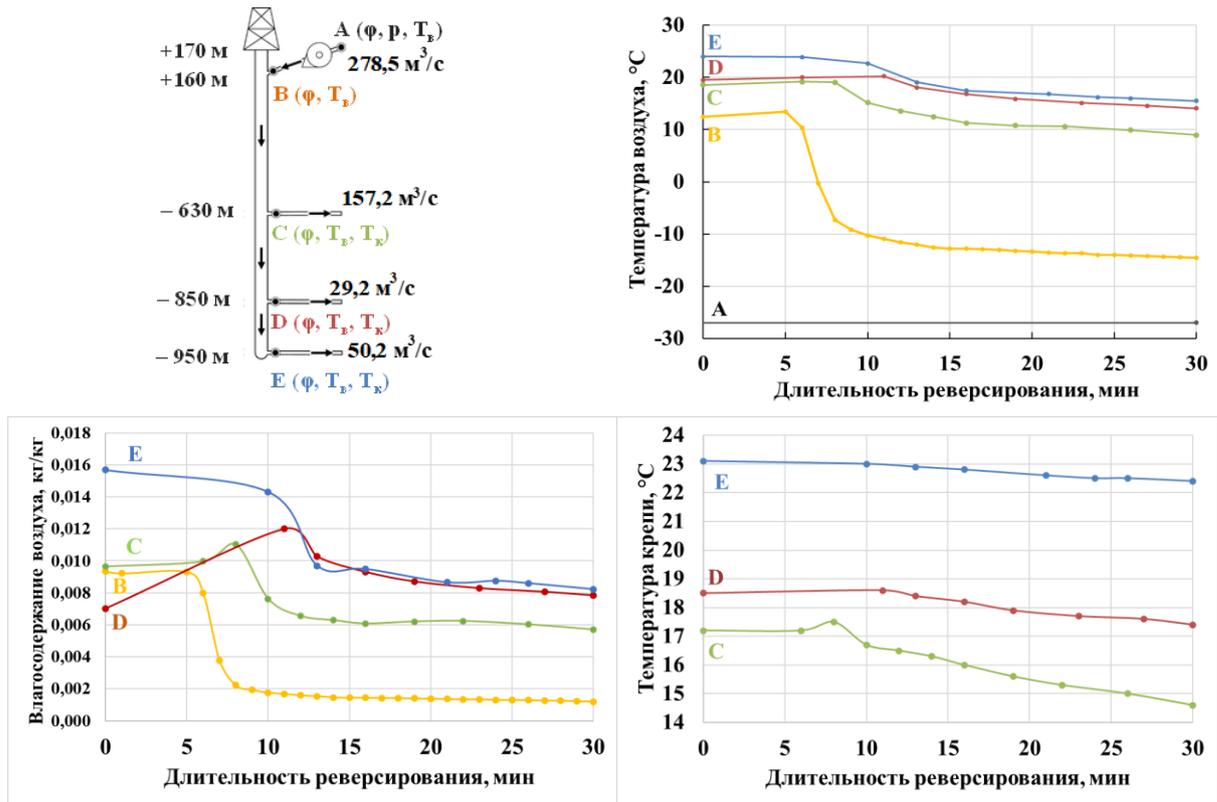


Рисунок 3 — Результаты экспериментальных исследований в вентиляционном стволе ВС-9 в реверсивном режиме проветривания рудника Скалистый

Полученные данные использовались для расчета эффективных коэффициентов теплоотдачи $\alpha(x)$ и температуропроводности $a_m(x)$ системы «воздух-крепь-массив» на основе математической модели (1) – (9). В рамках данной модели принят ряд допущений, а именно: не учитывается вертикальный теплоперенос и фазовые переходы влаги в массиве горных пород и крепи ствола, поле температур воздуха в поперечном сечении ствола принято однородным, а распределение расходов воздуха в стволе при переходе на реверсивный режим считается установившимся. Во влажном массиве горных пород и крепи принимается гипотеза о локальном тепловом равновесии.

Параметры $a_m(x)$ и $k(x)$ подобраны так, чтобы результаты экспериментальных измерений на замерных станциях температуры воздушного потока $\tilde{T}(t_i)$ и температуры крепи $\tilde{T}_m(t_j)$ были как можно ближе к соответствующим температурам, полученным в результате численного моделирования, т.е. чтобы выполнялись условия:

$$\begin{cases} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{T}(t_i) - T(t_i))^2}{n}} \rightarrow \min \\ \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^k (\tilde{T}_m(t_j) - T_m(t_j))^2}{k}} \rightarrow \min \end{cases} \quad (10)$$

В результате минимизации невязок (10) получены следующие значения: $a_m = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ – для участков ствола с чугунной тубинговой крепью и $a_m = 5,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ – для участков с монолитной бетонной крепью; при этом полученные величины лежат в диапазоне возможных значений, представленных в справочной литературе.

Значения $k(x)$ и соответствующие эффективные коэффициенты теплоотдачи представлены в таблице 1. Различные значения $k(x)$ для разных участков ствола ВС-9 обусловлены разной степенью увлажненности поверхности крепи ствола, о чем косвенно свидетельствуют данные об изменении влагосодержания воздушных потоков и среднем приросте влагосодержания в воздушном потоке на каждые 100 м пути.

Таблица 1 — Эффективные коэффициенты теплоотдачи вентиляционного ствола ВС-9

Участок ствола	Средняя скорость воздуха	Средний прирост влагосодержания на 100 м	$k(x)$	Коэффициент теплоотдачи α
+160 м / –630 м	4,7 м/с	0,61 г/кг	4,9	40,0 Вт/(м ² ·°С)
–630 м / –850 м	1,8 м/с	1,20 г/кг	7,4	28,1 Вт/(м ² ·°С)
–850 м / –950 м	1,0 м/с	0,34 г/кг	2,9	6,9 Вт/(м ² ·°С)

Полученные эффективные коэффициенты температуропроводности и теплоотдачи применялись далее для параметризации модели тепломассопереноса в вентиляционном стволе. На рис 4 представлено сравнение рассчитанной в модели временной динамики температуры поверхности крепи и температуры воздуха на сопряжениях ствола ВС-9 с горизонтами и экспериментальных измерений в течение времени реверсирования ГВУ.

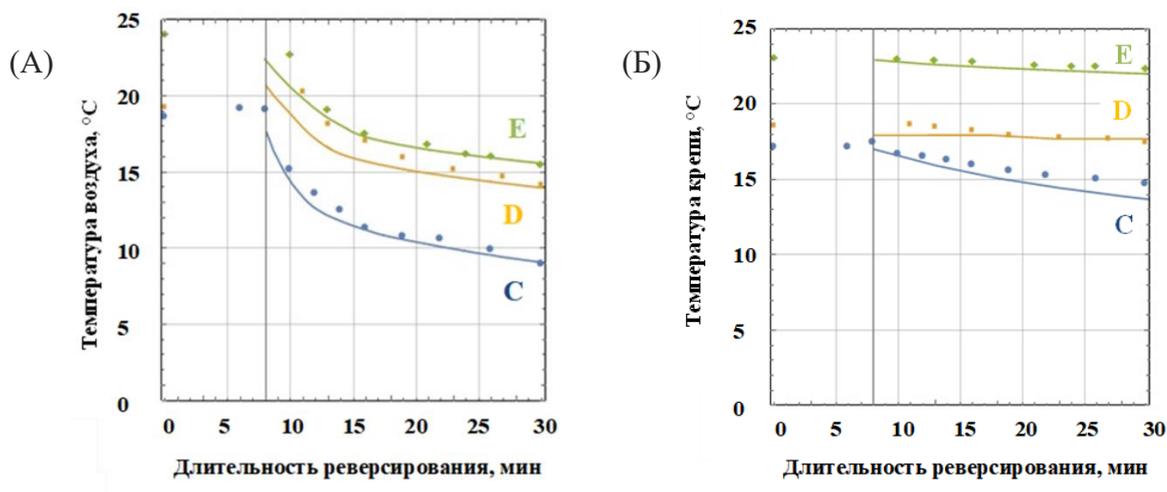


Рисунок 4 — Временная динамика температур воздуха (А) и крепи (Б) на сопряжениях ствола с вентиляционными горизонтами (сплошные линии – модель; точки – эксперимент)

В результате параметризации модели удалось достичь соответствия расчетных значений экспериментальным. Это позволяет сделать вывод, что данная модель применима для прогнозирования температурного поля в вентиляционном стволе, крепи и породном массиве и с ее помощью возможно исследование условий и закономерностей накопления капельной влаги в вентиляционных стволах рудников.

II научное положение

Увеличение аэродинамического сопротивления вентиляционного ствола, обусловленное наличием в нем капельной влаги вследствие ее конденсации из исходящего воздуха или поступления воды из закрепного пространства, достигает максимального значения в диапазоне скоростей воздушного потока 5,3 – 9,9 м/с, определяемого местом расположения источника водопритоков в стволе и условием уравнивания силы тяжести капель и аэродинамического сопротивления со стороны поднимающегося воздушного потока.

Одним из негативных нестационарных процессов тепломассопереноса в вентиляционных стволах является бланкет-эффект, или эффект водяной пробки, который возникает при наличии капельной влаги во взвешенном состоянии, создающей сопротивление движению воздушной струи. Капельная влага противодействует движению воздушного потока с силой, равной весу всех капель, находящихся в стволе. При этом капли могут двигаться как вверх, так и вниз в зависимости от соотношения скорости воздушного потока V_a и конечной скорости капли V_k , которая в свою очередь зависит от диаметра капель. Разными исследователями получены различные функции распределения капель по диаметрам $n(D)$, выведенные на основе подсчета количества капель дождей различной интенсивности. Наиболее часто применяются эмпирические функции распределения Маршалла-Пальмера, Беста, Лауса-Парсонса, Файнгольда-Левина, Розина-Раммлера. В настоящей работе применялась функция распределения Розина-Раммлера, т.к. она позволяет рассчитывать распределение капель по массам в более широком диапазоне интенсивностей водопритоков, чем другие.

В случае, когда капельная влага в стволе образуется только в результате конденсации из исходящего воздуха, механизм возникновения бланкет-эффекта следующий. По мере движения насыщенного воздуха вверх по стволу его давление и температура уменьшаются, вследствие чего из воздуха конденсируется влага. В процессе дальнейшего движения происходит процесс образования капель различных размеров вследствие слияния мелких капель, а также разбивания крупных капель в результате взаимодействия с крепью и оборудованием ствола. Дополнительный перепад давления ΔP в стволе за счет наличия капельной влаги массой M в условиях стационарности влагообмена в стволе с площадью сечения S можно рассчитать по формуле:

$$\Delta P = \frac{Mg}{S} = \begin{cases} \frac{gh\rho_a\Delta d \int_0^{D_{max}} n(D)D^3 dD}{\int_0^{D_k} \left(1 - \frac{V_k}{V_a}\right) n(D)D^3 dD + \int_{D_k}^{D_{max}} \left(\frac{V_k}{V_a} - 1\right) n(D)D^3 dD}, & V_a < V_{max} \\ \frac{gh\rho_a\Delta d \int_0^{D_{max}} n(D)D^3 dD}{\int_0^{D_{max}} \left(1 - \frac{V_k}{V_a}\right) n(D)D^3 dD}, & V_a > V_{max} \end{cases}, \quad (11)$$

где $V_{max} = 9,26$ м/с – конечная скорость каплей с диаметром $D_{max} = 6$ мм; h – глубина, на которой начинается процесс конденсации влаги, отсчитываемая от поверхности, м; Δd – изменение влагосодержания воздуха при подъеме по стволу, кг/кг; D_k – критический диаметр капли, соответствующий ее конечной скорости; V_a – скорость воздушной струи в стволе, м/с.

На рис. 5 представлен график зависимости перепада давления (депрессии) в стволе за счет сконденсировавшейся влаги от скорости исходящего воздушного потока для условий вентиляционного ствола ВС-7 рудника Таймырский. В ходе экспериментальных исследований в вентиляционном стволе ВС-7 установлено, что скорость выделения влаги за счет конденсации составила 1,7 кг/с, и при скорости воздушного потока в стволе 9,1 м/с депрессия водяной пробки составила 92 Па.

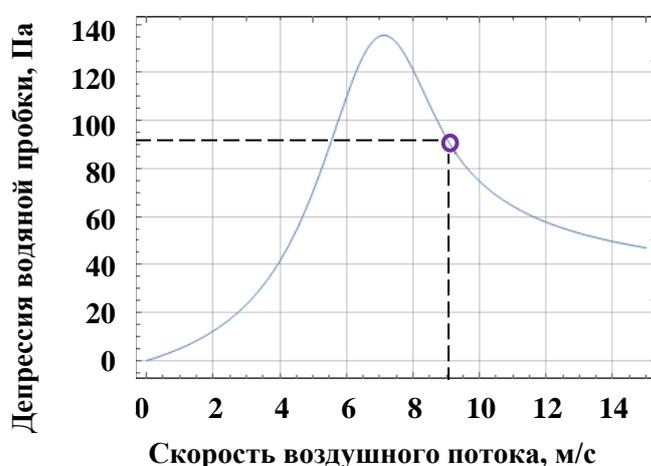


Рисунок 5 — Зависимость депрессии водяной пробки в стволе ВС-7 рудника Таймырский от скорости воздушного потока

Полученный график имеет максимум при скорости воздушного потока в стволе около 7,2 м/с, при этом существенное влияние водяной пробки может проявляться в некотором диапазоне скоростей в окрестности точки максимума. Определим опасный по фактору формирования водяной пробки диапазон скоростей воздушного потока в стволе такой, при котором влияние бланкет-эффекта составляет более 50% от его максимального значения. При этом для различных скоростей конденсационного влаговыведения имеется свой диапазон опасных скоростей воздушного потока в вентиляционном стволе, рассчитанный согласно (11) (см. таблицу 2).

Таблица 2 — Диапазон опасных скоростей воздушного потока по фактору формирования водяной пробки в вентиляционном стволе вследствие конденсационного влаговыведения

Скорость конденсационного влаговыведения в стволе	1,7 кг/с	5 кг/с	10 кг/с
Диапазон опасных скоростей воздушного потока в стволе	4,9 – 10,2 м/с	6,1 – 9,4 м/с	7,5 – 9,5 м/с

Другим источником капельной влаги в стволе могут являться притоки воды с водоносных горизонтов через негерметичную крепь ствола. В этом случае избыточный перепад давления водяной пробки в стволе рассчитывается по следующей формуле:

$$\Delta P = \begin{cases} \frac{\frac{gHq}{SV_a} \left(\frac{h}{H} \int_0^{D_k} n(D)D^3 dD + \left(1 - \frac{h}{H}\right) \int_{D_k}^{D_{max}} n(D)D^3 dD \right)}{\left(\int_0^{D_k} \left(1 - \frac{V_k}{V_a}\right) n(D)D^3 dD + \int_{D_k}^{D_{max}} \left(\frac{V_k}{V_a} - 1\right) n(D)D^3 dD \right)}, & V_a < V_{max} \\ \frac{\frac{gHq}{SV_a} \left(\frac{h}{H} \int_0^{D_{max}} n(D)D^3 dD \right)}{\left(\int_0^{D_{max}} \left(1 - \frac{V_k}{V_a}\right) n(D)D^3 dD \right)}, & V_a > V_{max} \end{cases}, \quad (12)$$

где h – глубина источника водопритоков, м; q – интенсивность водопритоков в ствол, кг/с.

На рис. 6 представлены графики зависимости перепада давления водяной пробки от скорости исходящего воздушного потока для различных значений интенсивности и местоположений источника водопритоков в условиях вентиляционного ствола ВС-7. Максимальные значения достигаются, когда источник находится либо вблизи сопряжения с вентиляционным каналом ГВУ, либо вблизи сопряжения с вентиляционным горизонтом.

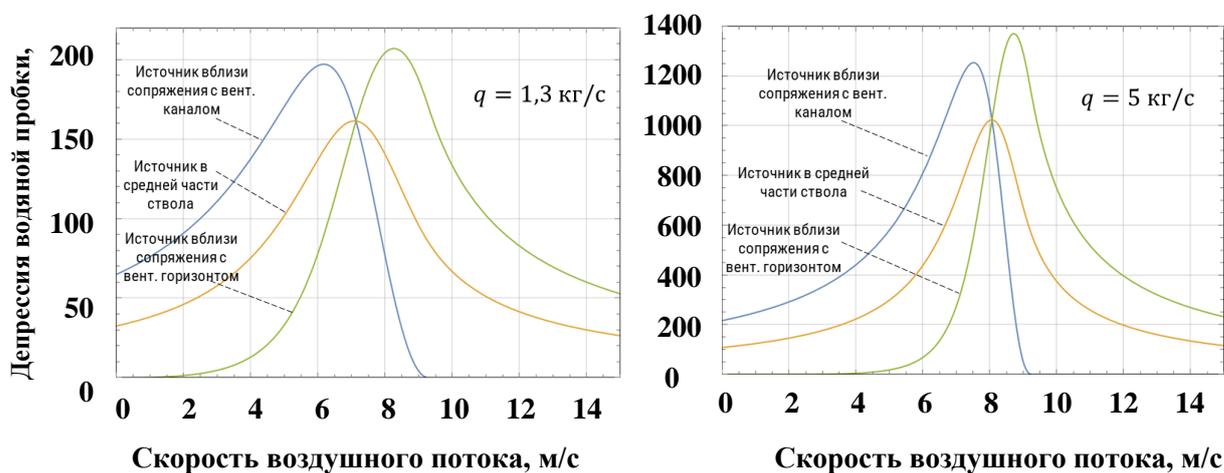


Рисунок 6 — Зависимость депрессии водяной пробки в стволе от скорости воздушного потока для различных местоположений и интенсивностей источника водопритоков

Для различных интенсивностей и расположений источника водопритоков имеется свой диапазон опасных скоростей воздушного потока в стволе (см. таблицу 3).

Таблица 3 — Диапазон опасных скоростей воздушного потока по фактору формирования водяной пробки в вентиляционном стволе вследствие водопритоков

Расположение источника водопритоков в вентиляционном стволе	Интенсивность водопритоков в вентиляционный ствол		
	1,3 кг/с	5 кг/с	10 кг/с
Вблизи сопряжения с вентиляционным каналом	2,4 – 7,8 м/с	5,3 – 8,4 м/с	6,5 – 8,7 м/с
В средней части ствола	4,2 – 9,4 м/с	6,3 – 9,4 м/с	7,3 – 9,4 м/с
Вблизи сопряжения с вентиляционным горизонтом	6,3 – 10,9 м/с	7,7 – 10,2 м/с	8,2 – 9,9 м/с

Полученные результаты расчетов были сопоставлены с результатами трехмерного численного моделирования для случая нахождения источника водопритоков вблизи сопряжения с вентиляционным горизонтом (см. рис. 7). Из рис. 7 видно, что результаты трехмерного CFD-моделирования достаточно хорошо коррелируют с результатами одномерного теоретического анализа формирования водяной пробки в стволе: пиковые значения депрессии водяной пробки отличаются менее чем на 17 %, при этом наиболее опасные скорости отличаются менее чем на 6%. Отклонения в результатах можно объяснить тем, что в численной модели учтено взаимодействие капель со стенками ствола и друг с другом в рамках стохастической модели и алгоритму О' Рурка.

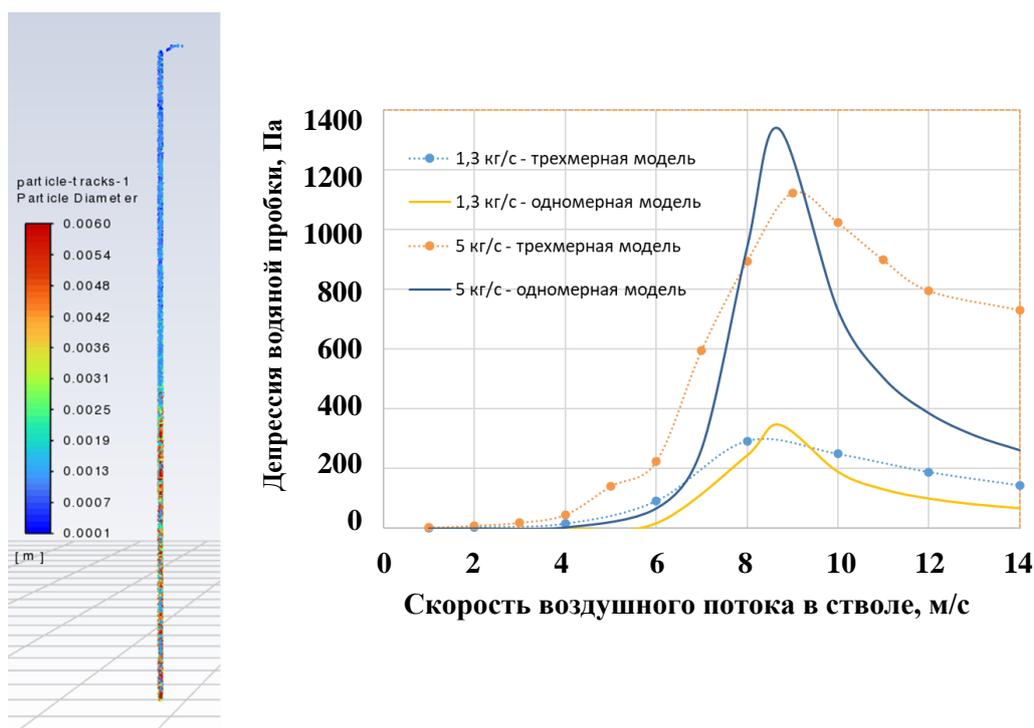


Рисунок 7 — Сравнение одномерной аналитической и трехмерной численной моделей формирования водяной пробки в вентиляционном стволе

Установленные закономерности формирования водяной пробки в вентиляционных стволах использовались в дальнейшем для разработки способов управления капельной влагой, направленных на сокращение негативного влияния бланкет-эффекта на работу главной вентиляторной установки.

III научное положение:

Способы управления капельной влагой, учитывающие геометрические параметры вентиляционного ствола, изменение влагосодержания, скорость исходящей струи воздуха, местоположение источника и величины водопритоков в ствол, которые заключаются в реализации мероприятий по сокращению интенсивности поступающей в ствол воды и регулировании параметров системы вентиляции рудника и позволяют уменьшить аэродинамическое сопротивление водяной пробки и ее влияние на работу главной вентиляторной установки.

В начальный период после включения ГВУ процесс формирования водяной пробки в вентиляционном стволе имеет нестационарный характер, поэтому разработка способов управления капельной влагой и параметрами системы вентиляции рудника на предмет минимизации эффекта водяной пробки требует знания характерных времен накопления капельной влаги в стволах. Следует отметить, что попадание в вентиляционный ствол воды из закрепного пространства является более опасной ситуацией с точки зрения формирования водяной пробки по сравнению с конденсационным влаговыделением из исходящей воздушной струи, поэтому дальнейший анализ влияния капельной влаги на увеличение аэродинамического сопротивления ствола и рабочую точку главной вентиляторной установки будет проводиться для случая наличия водопритоков в стволе.

Избыточный перепад давления вследствие наличия в стволе постепенно накапливающейся капельной влаги общей массой $M(t)$ равен ее весу в момент времени t после включения ГВУ, отнесенному к площади сечения ствола:

$$\Delta P(t) = \frac{M(t)g}{S}. \quad (13)$$

В случае формирования бланкет-эффекта за счет водопритоков из закрепного пространства $M(t)$ рассчитывается следующим образом:

$$M(t) = \int_0^t \left(q - \frac{\pi \rho_w S}{6 \cdot 10^9} \left(\int_0^{D_1(t')} (V_a - V_k) n(D) D^3 dD + \int_{D_2(t')}^{D_{max}} (V_k - V_a) n(D) D^3 dD \right) \right) dt', \quad (14)$$

где $D_1(t')$ и $D_2(t')$ – диаметры капель, достигших верхней и нижней границы ствола соответственно.

Формулы (13) и (14) отражают следующую динамику накопления капель в стволе. В некоторый начальный период после включения ГВУ в воздушном пространстве ствола будет происходить накопление капель всех диаметров, пока самые легкие капли не достигнут верхней границы ствола, а самые тяжелые капли не достигнут нижней границы. В этот период $D_1(t') = 0$, а $D_2(t') = 6$ мм. После этого мелкие капли все больших диаметров будут покидать ствол через верхнюю границу до тех пор, пока $D_1(t') < D_k$; а крупные капли всё меньших диаметров будут покидать ствол через нижнюю границу, пока $D_2(t') > D_k$. Еще через

некоторое время количество капель всех размеров, попадающих в ствол, сравнивается с количеством капель, покидающих ствол.

На рис. 8 представлены расчеты времени формирования водяной пробки в зависимости от скорости воздуха в стволе для различных интенсивностей и высоты источника водопритоков.

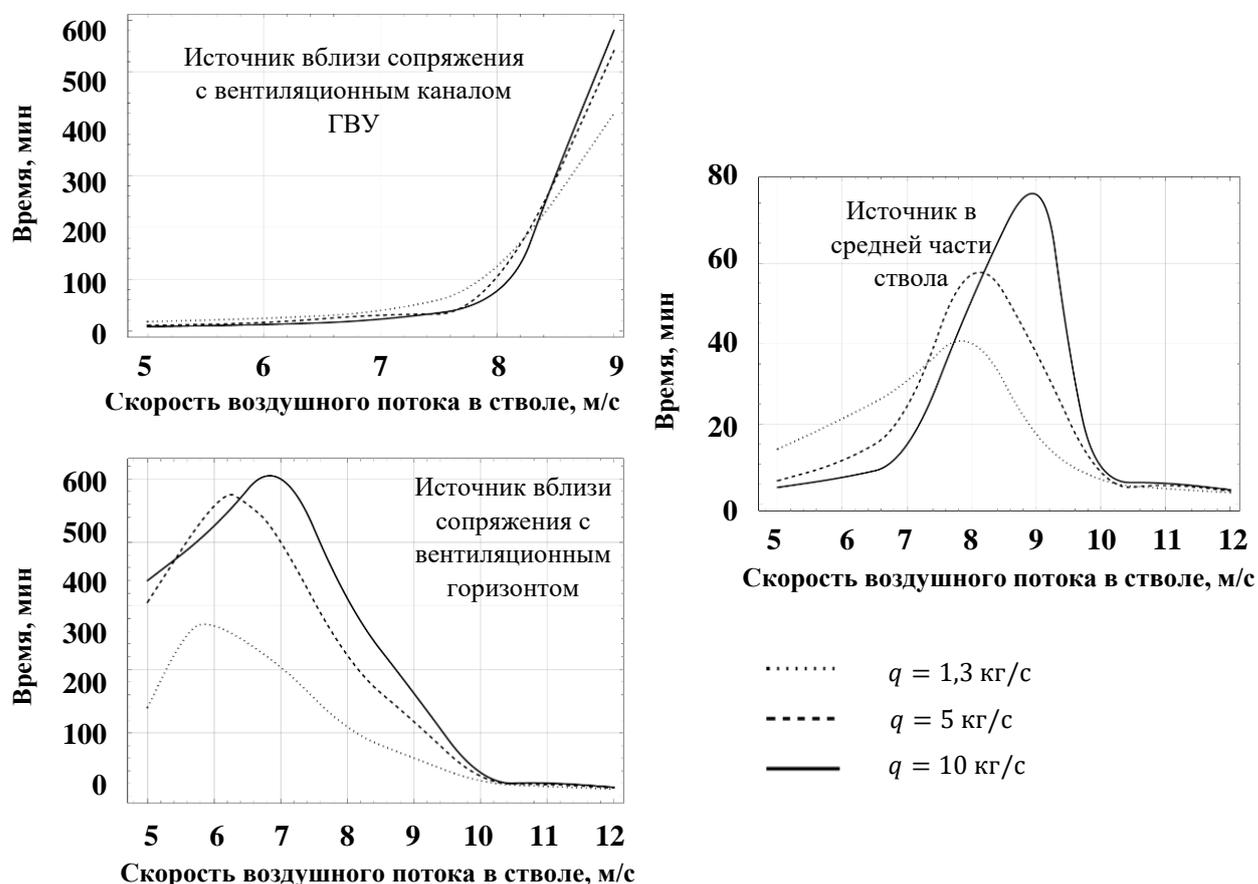


Рисунок 8 — Время формирования водяной пробки в стволе в зависимости от скорости воздуха для различных местоположений и интенсивностей источника водопритоков

Таким образом, процесс формирования водяной пробки в опасных диапазонах скоростей может занимать временной промежуток от нескольких десятков до сотен минут, что соотносится с результатами наблюдений, представленными в существующей литературе.

Наличие в стволе водяной пробки приводит к тому, что главная вентиляторная установка затрачивает часть депрессии на преодоление ее сопротивления. Изменение рабочей точки ГБУ вследствие бланкет-эффекта существенно зависит от напорной характеристики ГБУ и ее рабочей точки в начальный момент. На рис. 9 представлена характеристика вентиляционной сети с учетом и без учета влияния бланкет-эффекта, а также аэродинамические характеристики ГБУ ВЦД-47 «Север» ствола ВС-6 рудника Таймырский. Исходные данные для расчета представлены в таблице 4. Для расчета изменения рабочей точки ГБУ применялся графический способ.

Таблица 4 — Исходные данные для расчета влияния водяной пробки в вентиляционном стволе ВС-6 на работу ГВУ

Глубина ствола	1600,6 м
Диаметр / сечение ствола в свету	6,5 м / 33,18 м ²
Абсолютная отметка устья ствола	+278,6 м
Фактические водопритоки в ствол	28 м ³ /час = 7,8 кг/с
Абс. отм. подошвы наиболее водообильного водоносного горизонта	– 821 м

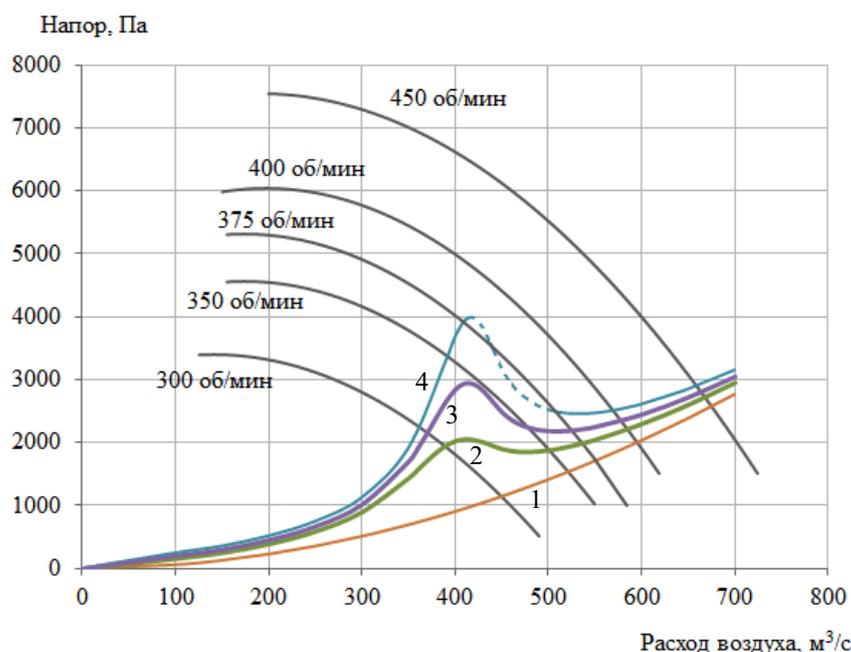


Рисунок 9 — Аэродинамические характеристики ГВУ ВЦД-47 «Север» при различных частотах вращения рабочего колеса; характеристика вентиляционной сети:

- 1) без учета влияния водяной пробки от водопритоков;
- 2) с учетом водопритоков 3,9 кг/с (50%); 3) с учетом водопритоков 5,9 кг/с (75%);
- 4) с учетом водопритоков 7,8 кг/с (100%).

Из рис. 9 видно, что при отсутствии капельной влаги в стволе рабочая точка ГВУ определяется пересечением кривых напорной характеристики вентилятора (при заданном угле поворота лопаток и частоте вращения рабочего колеса) и характеристики вентиляционной сети 1. При наличии в стволе капельной влаги ее количество будет постепенно возрастать до момента установления стационарного влияния бланкет-эффекта, при этом будет увеличиваться аэродинамическое сопротивление ствола и возрастать депрессия ГВУ до момента установления устойчивого равновесного состояния, определяемого пересечением характеристики ГВУ и характеристики сети с учетом влияния водяной пробки.

Из рис. 9 видно, что работа ГВУ с частотой вращения рабочего колеса от 300 до 400 об/мин может привести к режиму работы ГВУ, при котором влияние бланкет-эффекта максимально в условиях фактических водопритоков интенсивностью 7,8 кг/с, при этом максимально возможное значение депрессии водяной пробки в данном случае составляет

около 3000 Па при скорости воздушного потока в стволе 8,7 м/с, что составляет существенную часть напора ГВУ.

Способ управления капельной влагой, позволяющий уменьшить сопротивление водяной пробки в стволе, реализуется в следующей последовательности. В первую очередь для исключения возникновения бланкет–эффекта или существенного уменьшения его влияния на систему вентиляции рудника как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации рудника следует предусмотреть и реализовать следующие мероприятия, направленные на уменьшение количества капельной влаги, попадающей в ствол: герметизация крепи ствола в местах водопритоков с целью исключения или уменьшения интенсивности попадания влаги в ствол; реализация системы водоулавливания в стволе в местах ожидаемых водопритоков ниже водоносных горизонтов; реализация системы дренирования воды, сущность которой заключается в бурении шпуров в стенках ствола на уровне водоносных горизонтов и установке в них водоспускных или забивных фильтров; реализация системы водоулавливания и откачки воды в вентиляционном канале ствола с целью исключения повторного попадания влаги в воздушное пространство ствола (для улавливания воды, попадающей в вентиляционный канал, рекомендуется на сопряжении со стволом соорудить непроницаемую перегородку и установить насос с автоматическим включением для откачки воды на поверхность). Применение данных мероприятий позволит «сгладить» характеристику вентиляционной сети. На рис. 9 для примера приведены характеристики вентиляционной сети для случаев, когда с помощью реализованных выше мероприятий удалось снизить интенсивность водопритоков в ствол на 25% (кривая 3) и на 50% (кривая 2). Также на рис. 10 представлен график максимального перепада давления водяной пробки в зависимости от процента снижения поступления воды в ствол (водоулавливания) для исследуемого случая. Из графика видно, что для снижения влияния водяной пробки в стволе в два раза, требуется сократить поступление влаги примерно на 35%.

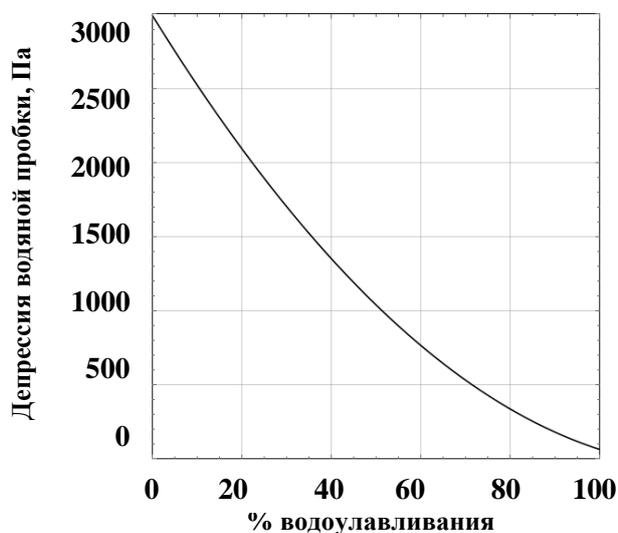


Рисунок 10 — Максимальный перепад давления водяной пробки в зависимости от снижения поступления воды в ствол

В случае, когда применение вышеуказанных мероприятий неосуществимо или труднореализуемо, то снизить влияние бланкет-эффекта следует с помощью перераспределения воздушных потоков, а также с помощью регулирования параметров ГВУ. При наличии в руднике более одного вентиляционного ствола следует предусмотреть перераспределение исходящих воздушных потоков между ними таким образом, чтобы скорость движения воздуха в стволах лежала вне опасного диапазона наибольшего влияния бланкет-эффекта. Перераспределение воздушных потоков между стволами следует производить с учетом следующих требований:

1. Расход воздуха, подаваемого в рудник, должен быть не менее требуемого расхода, рассчитанного по соответствующим методикам, при этом максимальная скорость воздушного потока в стволах не должна превышать 15 м/с согласно ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»;
2. Новое воздухораспределение не должно приводить к увеличению энергопотребления ГВУ.

Если проектом предусмотрена схема вентиляции рудника с одним вентиляционным стволом, то выбор диаметра ствола на стадии проектирования рудника следует производить, исходя из минимизации эффективного аэродинамического сопротивления ствола с учетом влияния бланкет-эффекта. На стадии эксплуатации регулирование заключается в смещении рабочей точки ГВУ вправо (за счет изменения угла наклона лопаток вентилятора или увеличения частоты вращения рабочего колеса) – в область больших расходов воздуха, при этом регулирование следует производить так, чтобы не увеличилась суммарная потребляемая мощность ГВУ. Возможны несколько ситуаций, которые можно продемонстрировать на примере аэродинамических характеристик ГВУ ВЦД–47 «Север» (рис. 9).

1. В случае, когда ГВУ работает при частотах вращения рабочего колеса от 300 до 400 об/мин, рабочая точка будет находиться в зоне существенного влияния водяной пробки, поэтому для минимизации бланкет-эффекта необходимо увеличить частоту вращения рабочего колеса для перехода рабочей точки в положение правее от зоны влияния бланкет-эффекта в зависимости от требуемого количества воздуха и КПД вентилятора.
2. В случае, если у ГВУ нет резерва, чтобы преодолеть потенциальный барьер водяной пробки (если ГВУ работает при максимальной частоте вращения рабочего колеса), и при этом за потенциальным барьером вентилятор может устойчиво работать в области высоких расходов, необходимо сначала снизить частоту вращения рабочего колеса и временно перейти в область сниженных расходов, чтобы сбросить большую часть капельной влаги в зумпф. После этого следует вновь перевести ГВУ в режим с максимальной частотой вращения рабочего колеса, что позволит выйти в область

повышенных расходов, перейдя за не успевший сформироваться потенциальный барьер водяной пробки.

3. В случае, когда ГВУ не имеет резерва чтобы преодолеть потенциальный барьер водяной пробки или работать в режиме повышенной производительности в области за потенциальным барьером, уменьшить влияние бланкет-эффекта возможно только с помощью мероприятий, направленных на уменьшение количества капельной влаги, попадающей в ствол.

Результаты работы использованы на практике при выполнении работы по выбору и обоснованию параметров устойчивого проветривания рудника в нормальном режиме, исключающих возможность возникновения эффекта водяной пробки в стволах рудника Таймырский при введении в эксплуатацию системы шахтного кондиционирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение научно–практической задачи разработки способов управления капельной влагой, исключающего ее накопление в вентиляционных стволах рудников, и получены следующие основные научные результаты.

1. Разработана математическая модель нестационарных аэротермодинамических процессов в вентиляционных стволах с учетом неоднородного поля температур, теплообмена с крепью ствола, наличия конденсации влаги и водопритоков.
2. Проведены экспериментальные исследования изменения аэротермодинамических параметров воздуха в вентиляционных стволах в условиях нормального и реверсивного режимов проветривания рудников и выявлены закономерности протекания нестационарных процессов тепломассопереноса в стволах и прилегающих к ним горных выработках. Получено, что в нормальном режиме проветривания вследствие охлаждения восходящего потока воздуха в стволе возможно образование и скопление большого количества капельной влаги, приводящей при определенных обстоятельствах к образованию водяной пробки, увеличивающей аэродинамическое сопротивление ствола и ухудшающей работу главной вентиляторной установки. При переходе в реверсивный режим проветривания рудника ключевыми факторами, определяющими распределение микроклиматических параметров в вентиляционном стволе, являются теплообмен воздуха с крепью, теплопередача в крепи и окружающих породах.
3. С целью параметризации разработанной математической модели разработан метод определения эффективных коэффициентов температуропроводности и теплоотдачи системы «породный массив – влажная крепь ствола – воздушный поток» по данным экспериментальных измерений в стволе в условиях перехода на реверсивный режим проветривания рудника. В рамках экспериментальных исследований в стволе ВС–9 рудника «Скалистый» установлено, что значение коэффициента теплоотдачи существенно неоднородно и изменяется по высоте ствола от сопряжения с

вентиляционным каналом до сопряжения с нижним вентиляционным горизонтом в диапазоне от 40,0 до 6,9 Вт/(м²·°С) вследствие различных средних скоростей воздушного потока в стволе, материалов крепи и степени увлажненности поверхности крепи.

4. Исследованы два сценария возникновения капельной влаги в стволе, формирующей водяную пробку: в результате конденсации из влажного исходящего воздуха и в результате водопритоков из закрепного пространства ствола. Получены аналитические зависимости избыточного перепада давления в стволе вследствие влияния бланкет–эффекта от высоты и диаметра ствола, скорости исходящего потока воздуха с учетом различного дисперсного состава капельной влаги. Для сценария, предусматривающего приток воды из закрепного пространства, избыточный перепад давления в стволе зависит от интенсивности и высоты источника водопритоков.
5. Разработаны способы управления капельной влагой в вентиляционных стволах проектируемых и эксплуатируемых рудников, позволяющие снизить количество конденсирующейся из поднимающегося воздушного потока влаги и уменьшить ее влияние на работу ГВУ, при этом управление достигается как за счет перераспределения воздушных потоков между вентиляционными стволами таким образом, чтобы скорость движения воздуха в стволах лежала вне опасного диапазона от 4,9 м/с до 10,2 м/с, так и за счет размещения градирен системы кондиционирования воздуха вблизи ствола (последнее – только в случае потребности охлаждения рабочих зон рудников).
6. Разработаны способы управления капельной влагой в вентиляционных стволах проектируемых и эксплуатируемых рудников, направленные на снижение поступления водопритоков из закрепного пространства в воздушное пространство ствола с целью уменьшения ее влияния на работу ГВУ. Управление капельной влагой включает в себя герметизацию крепи ствола, реализацию систем водоулавливания и откачки воды в стволе и вентиляционном канале, а также перераспределение воздушных потоков между вентиляционными стволами таким образом, чтобы скорость движения воздуха в стволах лежала вне опасного диапазона от 5,3 м/с до 9,9 м/с.

**СПИСОК РАБОТ,
опубликованных автором по теме диссертации**

**Публикации в изданиях, утвержденных Высшей аттестационной комиссией при
Министерстве науки и высшего образования РФ**

1. Колесов Е. В., Казаков Б. П., Семин М. А. Моделирование теплообмена между крепью шахтного ствола и проходящим по стволу воздухом в условиях смешанной конвекции // Физико–технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2021. – № 5. – С. 160–171. DOI: 10.15372/FTPRPI20210515
2. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэрогазодинамических процессов в вентиляционных сетях шахт и рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 6. – С. 5–33. – DOI 10.25018/0236_1493_2021_6_0_5.
3. Семин М.А., Мальцев С.В., Колесов Е.В. Исследование влияния аэродинамических процессов в шахтном стволе с канатной арматурой на колебания движущегося скипа // Недропользование. – 2022. – Т.22, №4. – С.192–200. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.4.7
4. 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. – 2023. – № 3. – С. 57–71. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_57
5. Kolesov E., Kazakov B., Shalimov A., Zaitsev A. Study of the Water Build-Up Effect Formation in Upcast Shafts // Mathematics. – 2023. – 11. – 1288. DOI: 10.3390/math11061288. (Web of Science Q1)

Публикации в других изданиях

6. Kolesov E.V., Kazakov B.P., Grishin E.L. Study of the convective stratification of airflows in a mine shaft // J. Phys.: Conf. Ser. –2021. – 1945 012020.

Сдано в печать _____ 2023 г.

Формат 60x84/16. Тираж 100 экз.

Отпечатано сектором НТИ

«ГИ УрО РАН»

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А