

## РАЗРАБОТКА МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОЙ ЭВАКУАЦИИ ГОРНОРАБОЧИХ ЧЕРЕЗ ВЕНТИЛЯЦИОННЫЕ СТВОЛЫ ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ, РАСПОЛОЖЕННЫХ В СЕВЕРНЫХ РЕГИОНАХ

Н.А. Князев, А.С. Смородских, Д.С. Кормщиков  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** Статья является продолжением цикла работ по исследованию безопасности реверсирования вентиляционной струи на горнодобывающих предприятиях, расположенных в северных регионах. В работе рассмотрен подход к выбору компенсирующих мероприятий, обеспечивающих безопасность эвакуации людей через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи, основанный на анализе влияния холодного воздуха на отдельных этапах эвакуации. Выбор мероприятий основывается на сравнении фактической длительности эвакуации и прогнозируемого времени безопасного нахождения людей в различных участках рудника. В случае, если безопасного времени на определенном этапе эвакуации недостаточно, возможна реализация предлагаемого мероприятия. Рассматриваемый подход позволяет учесть индивидуальность условий эвакуации для различных горных предприятий и осуществить более точный выбор мероприятий.

**Ключевые слова:** реверсивный режим проветривания, глубокий рудник, вентиляционный ствол, компенсирующие мероприятия, моделирование, рудничная вентиляция, эвакуация.

### Введение

Задействование реверсивного режима проветривания в холодный период года может привести к поступлению воздуха с отрицательными температурами по вентиляционным (воздуховыдающим) стволам в рудник, так как данные стволы, как правило, не оборудованы системами подогрева воздуха. Возникновение аварийной ситуации с задействованием реверсивного режима проветривания влечёт за собой угрозу здоровью людей во время эвакуации по данным стволам. В работах [1-3] описано влияние холодного воздуха при подаче его в рудник. Данный вопрос имеет особую актуальность для горных предприятий, расположенных в арктическом и субарктическом климатических поясах, так как среднегодовая температура атмосферного воздуха в этих условиях составляет от  $-12$  до  $-14$  °С.

Для обеспечения безопасной эвакуации людей при реверсировании воздушной струи предлагается разработка компенсирующих и организационных мероприятий. Комплекс мероприятий подбирается индивидуально для каждого горного предприятия в зависимости от климатических и горно-технических условий [4]. В работе рассмотрен подход к выбору и обоснованию компенсирующих мероприятий по обеспечению безопасности во время зимнего реверса на примере исследований реверсивного режима проветривания действующего горного предприятия, расположенного в северном регионе Красноярского края. Подход основан на натурных исследованиях микроклиматических параметров воздуха при плановом реверсировании при отсутствии систем подогрева воздуха на вентиляционных стволах и прогнозе температурного режима вентиляционной струи при наиболее пессимистичных климатических и временных условиях.

### План разработки и выбора мероприятий

Разработка и выбор компенсирующих мероприятий для обеспечения безопасности при реверсировании выполнены на основе следующего плана исследований.

1. **Натурные исследования** – измерение микроклиматических параметров вентиляционной струи при плановом реверсировании на различных участках ствола.

2. **Прогноз температурного режима** – прогноз температурного режима вентиляционной струи, поступающей в рудник при реверсировании, на основе сетевого теплофизического моделирования при наиболее пессимистичных условиях.

3. **Расчёт времени эвакуации** – анализ времени эвакуации на основе плана мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварии и количества людей, участвующих в эвакуации.

4. **Оценка влияния холодного воздуха на человека** – учет влияния холодного воздуха на человека в зависимости от длительности реверсирования и времени эвакуации на основании тепловой модели. Определение времени безопасной эвакуации.

5. **Выбор компенсирующих мероприятий** – осуществляется, исходя из соотношения времени, требующегося на эвакуацию, и времени безопасной эвакуации при наиболее сложных условиях.

### **Натурные исследования**

Натурные замеры в рамках исследования проведены во время планового реверсирования вентиляционной струи в холодное время года. План проведения исследований с примером возможных результатов замеров описан в работе [5]. Необходимо отметить, что длительность планового реверсирования и параметры атмосферного воздуха на момент его проведения могут значительно отличаться от возможных условий во время возникновения аварийной ситуации. Результаты исследований необходимы для выбора параметров тепловой модели с целью приведения результатов моделирования к фактическим данным. После чего выполняется прогноз температурного режима вентиляционной струи на более длительный срок реверсирования при наиболее низкой температуре атмосферного воздуха. Подробное описание метода расчета распределения температуры воздуха в вентиляционном стволе при реверсировании воздушной струи, основанном на математическом моделировании нестационарных теплообменных процессов в стволе и окружающих породах, приведено в работах [5, 6].

### **Результаты прогноза температурного режима**

Математическое моделирование нестационарных теплообменных процессов в вентиляционном стволе выполнено с помощью модуля теплогазодинамического расчета программы «АэроСеть» [7-9]. Температура атмосферного воздуха при моделировании принята как абсолютно минимальная в соответствии с СП 131.13330.2018 «Свод правил. Строительная климатология», и равняется  $-57^{\circ}\text{C}$ . Длительность реверсирования ограничена 24 часами. Результаты прогноза распределения температуры воздуха в вентиляционном стволе на сопряжениях с вентиляционным каналом и технологическими горизонтами на отметках  $-680$  м,  $-850$  м и  $-950$  м представлены на рис. 1.

Полученные результаты моделирования температурного режима вентиляционной струи необходимы для оценки влияния холодного воздуха на горнорабочих при эвакуации через запасные выходы и определении времени безопасной эвакуации без применения мероприятий.

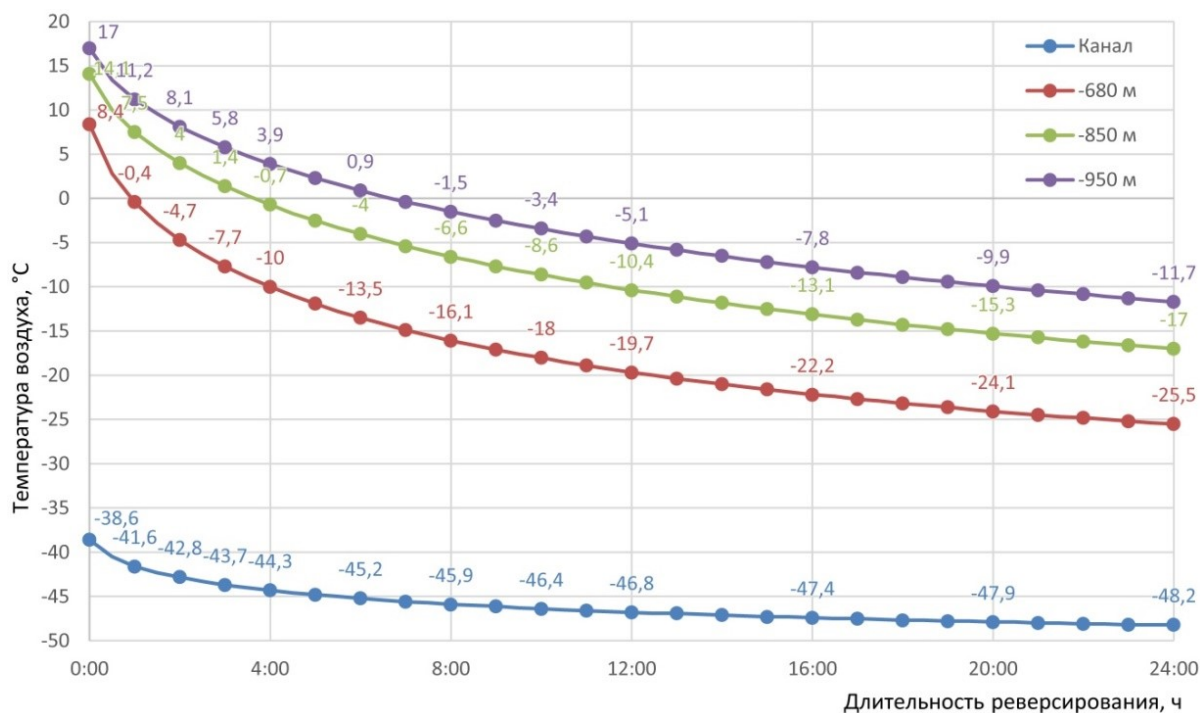


Рис. 1. Распределение температуры воздуха в реверсивном режиме проветривания

**Расчёт времени эвакуации**

Для оценки влияния холодного воздуха на организм человека необходимо учитывать длительность нахождения на холодной вентиляционной струе. При расчете времени нахождения людей в охлаждающем микроклимате маршрут эвакуации разделяется на следующие этапы.

1. Движение людей к вентиляционному стволу –  $T_1$ .
2. Ожидание подъемного сосуда вблизи ствола –  $T_2$ .
3. Подъем всех людей на поверхность –  $T_3$ .

Данные этапы эвакуации выполняются последовательно и могут занимать различное время в зависимости от количества людей, участвующих в эвакуации, и их местонахождения в руднике. При расчете времени эвакуации горнорабочих рассматривается наиболее пессимистичная ситуация – в эвакуации участвует наибольшее возможное количество людей, часть которых расположена в наиболее удаленном от запасного выхода участке рудника. Исходные данные при расчете времени эвакуации представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчёта времени эвакуации

Наибольшее количество людей, участвующих в эвакуации	110 человек
Наибольшее расстояние до вентиляционного ствола	3650 метра
Средняя скорость движения	48 м/мин
Вместимость клетки	36 человек
Время спуска\подъема клетки	5,5 минут
Время концевых операций (посадка/высадка)	5 минут

При расчете времени движения горнорабочих к вентиляционному стволу маршрут эвакуации определен согласно плану мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварии, а скорость движения людей – согласно пункту 46 методических рекомендаций РД 15-11-2007 [10]. В результате расчета наибольшее время движения людей до исследуемого вентиляционного ствола составило **1 час 16 минут (Т<sub>1</sub>)**.

Время ожидания вблизи ствола зависит от количества людей, участвующих в эвакуации, вместимости и времени подъема клетки, времени концевых операций (посадка и высадка людей). В результате расчета наибольшее время ожидания последней группы людей вблизи вентиляционного ствола составило **1 час 3 минут (Т<sub>2</sub>)**.

Время, через которое будет осуществлен подъем последней группы людей по стволу, складывается из времени движения к стволу, времени ожидания и времени посадки и подъема по стволу. В результате расчета время выхода всех людей на поверхность составило **2 часа 34 минуты (Т<sub>3</sub>)** с момента начала эвакуации.

### Оценка влияния холодного воздуха на горнорабочих при эвакуации

Оценка влияния холодного воздуха на человека при эвакуации выполнена на основе МР 2.2.7.2129-06. «Методические рекомендации. Физиология труда и эргономика» [11]. Данная методика использует интегральный показатель условий охлаждения (обморожения) ИПУОО для определения риска охлаждения и времени предельно допустимого пребывания человека в охлаждающем микроклимате:

$$\text{ИПУОО} = 34,654 - 0,4664t_b + 0,6337V \quad (1)$$

где  $t_b$  – температура воздуха, °С;  $V$  – скорость воздуха, м/с.

Степень влияния холодного воздуха и время безопасного нахождения на вентиляционной струе определяются в зависимости от величины ИПУОО, приведенной в таблице 2. Метод оценки влияния холодного воздуха на человека в зависимости от величины ИПУОО более подробно рассмотрен в работе [4].

Таблица 2

Зависимость степени влияния холодного воздуха  
и времени безопасного пребывания от величины ИПУОО

Значение ИПУОО	Степень влияния холодного воздуха	Время безопасного пребывания, мин
$\text{ИПУОО} \leq 34$	Отсутствует	Не ограничено
$34 < \text{ИПУОО} \leq 47$	Умеренное	60
$47 < \text{ИПУОО} \leq 57$	Критическое	1
$57 < \text{ИПУОО}$	Катастрофическое	0,5

Программный комплекс «Аэросеть», основываясь на результатах воздухо- и тепло-распределений, позволяет рассчитать время безопасного пребывания людей в охлаждающем микроклимате на различных участках вентиляционной сети рудника, как показано на рисунке 2. При этом учитывается фактор снижения температуры вентиляционной струи и изменение степени влияния холодного воздуха на одном и том же участке с увеличением времени реверсирования. На основе расчетов степени влияния холод-

ного воздуха в зависимости от длительности реверсирования произведен расчёт предельно допустимого времени эвакуации на каждом этапе.

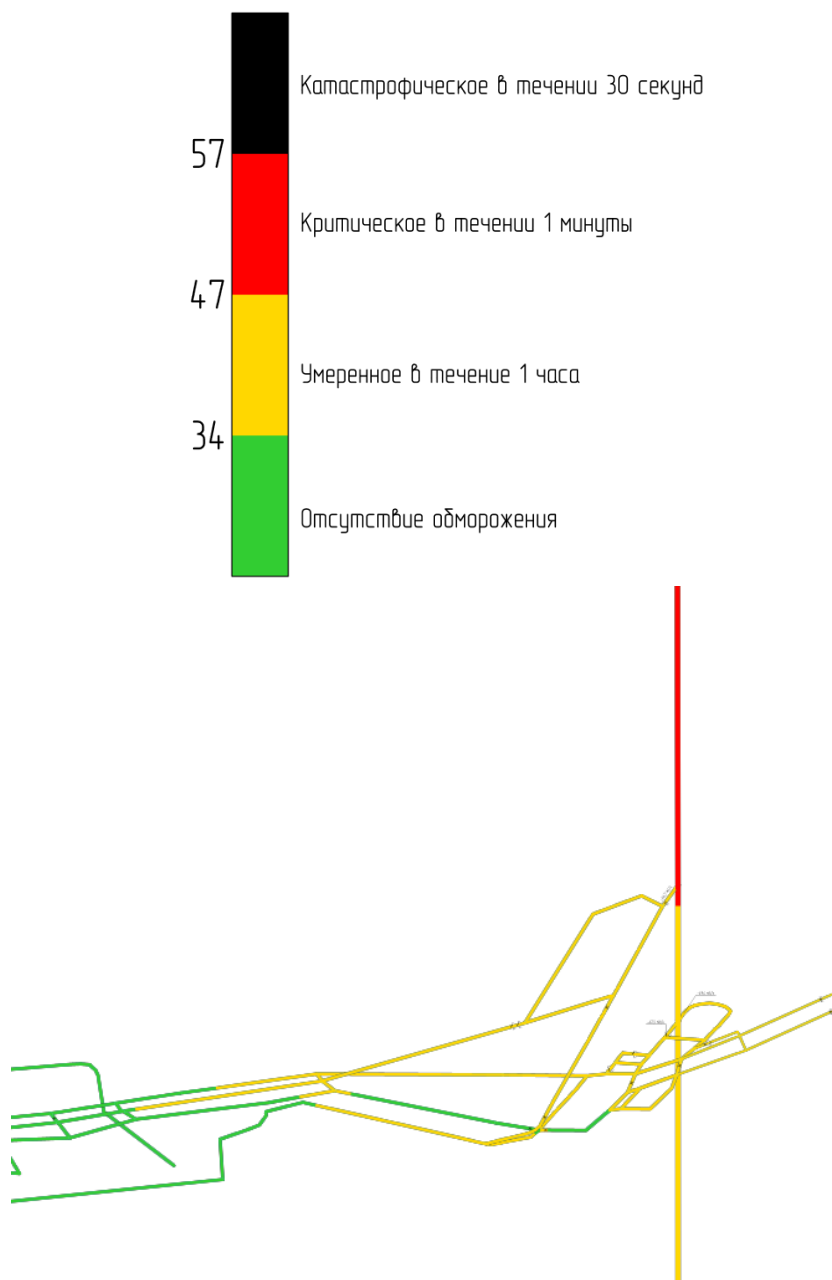


Рис. 2. Распределение зон влияния холодного воздуха через 12 часов реверсирования

Так как фактическое время движения людей к стволу может достигать 1 часа 16 минут, при расчете времени безопасного подхода к стволу принято, что люди не должны подвергаться критическому влиянию холодного воздуха более 1 минуты и умеренному – более 1 часа. В результате длительность безопасной эвакуации до ствола составила **14 часов 20 минут ( $M_1$ )** с начала реверсирования.

При расчете длительности безопасного ожидания вблизи ствола учитывается, что люди не должны подвергнуться умеренному влиянию холодного воздуха более 1 часа с момента подхода к стволу с учетом пребывания в зоне умеренного влияния по пути. В результате длительность безопасного ожидания составила **58 минут ( $M_2$ )**.

При определении времени безопасного подъема по стволу с начала реверсирования принято, что люди не должны подвергаться критическому влиянию холодного воздуха более 1 минуты, так как время подъема составляет 5,5 минут, а умеренное влияние холодного воздуха до 1 часа на данном участке считается безопасным. На рисунке 3 представлена схема и результаты моделирования, используемые при определении времени безопасного подъема по стволу.

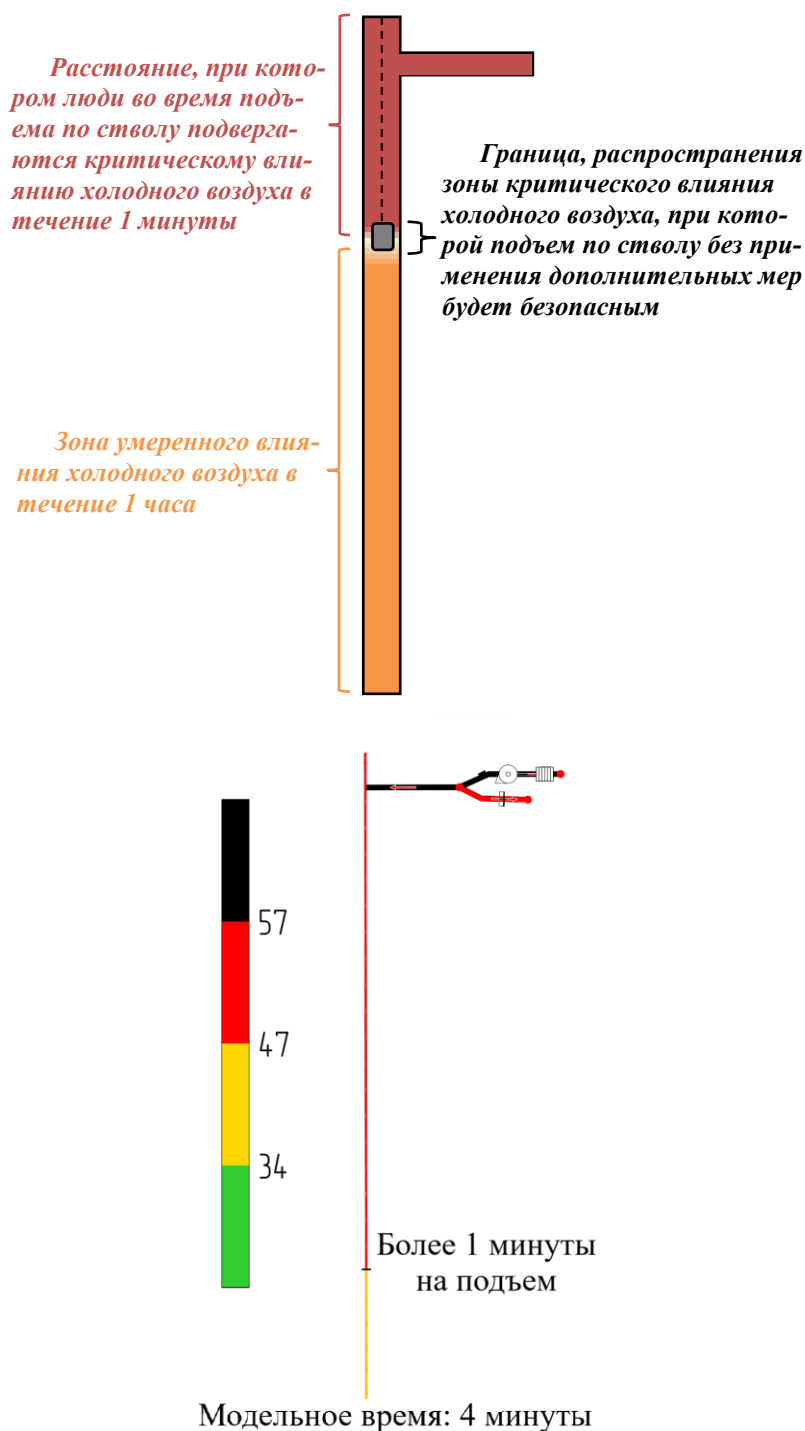


Рис. 3. Схема и результаты моделирования определения времени безопасной эвакуации по стволу

Согласно схеме на рисунке 3, с начала реверсирования происходит смещение зоны критического влияния холодного воздуха на человека вглубь ствола. При этом возни-

кает момент, когда нахождение человека при подъеме в клетки в условиях критических температур превышает 1 минуту. По результатам расчетов данное время составило **4 минуты ( $M_3$ )**. По истечению данного времени подъем по стволу без применения мероприятий является опасным с точки зрения обморожения открытых частей тела и общего охлаждения организма человека.

### Выбор мероприятий

На основе расчёта времени эвакуации и оценки влияния холодного воздуха на человека выполняется выбор компенсирующих мероприятий [4], обеспечивающих безопасность людей на каждом из рассматриваемых этапов эвакуации. При этом выполняется анализ условий безопасности эвакуации для каждого этапа. Если условия не выполняются, то предлагается применение следующих мероприятий [12].

1. Утепление клетки – направлено на обеспечение безопасного подъема по стволу. Модернизация клетки заключается в герметизации дверей, установке систем подогрева внутреннего воздуха, обшивке корпуса теплоизоляционными материалами.

2. Организация камер временного пребывания (КВП) – служит для обеспечения безопасного ожидания. На горизонтах, по которым осуществляется эвакуация горнорабочих, вблизи вентиляционных стволов организуются камеры временного пребывания. В качестве камер могут использоваться поддерживаемые тупиковые выработки, либо автономные камеры-убежища. Камеры необходимо обеспечить системами подогрева воздуха для поддержания допустимого температурного режима, средствами индивидуальной защиты от пониженных температур, а также питьевой водой.

3. Применение вспомогательных калориферных установок (ВКУ) – обеспечение безопасного подхода к стволу за счет подогрева вентиляционной струи. Выбор данного мероприятия исключается необходимостью применения иных мероприятий.

Стоит отметить, что применение первого и второго мероприятия целесообразно, когда при реверсировании в холодное время обеспечивается безопасный подход к стволам на протяжении всего времени эвакуации. На рудниках с небольшой глубиной ведения работ холодный воздух может распространяться по горным выработкам на значительные расстояния, что может приводить к переохлаждению горнорабочих еще в процессе движения к запасным выходам.

При выборе мероприятий использован алгоритм условий применения, представленный в таблице 3. Полученные ранее результаты сопоставлены с представленной матрицей условий выбора мероприятий. В результате определены требуемые компенсирующие мероприятия для обеспечения безопасности эвакуации горнорабочих для исследуемого объекта (Таблица 4).

Таблица 3

Матрица выбора компенсирующих мероприятий

Мероприятия	Условие применения мероприятия
Утепление клетки	$M_3 < T_3$
КВП	$M_2 < T_2$
ВКУ	$M_1 < T_1$

Таблица 4

Обработка результатов с использованием матрицы в условиях данного рудника

Мероприятия	Фактическое время эвакуации (Т)	Расчетное время безопасной эвакуации (М)	Необходимость применения мероприятий
Утепление клетки	2:34	0:04	+
КВП	1:03	0:58	+
ВКУ	1:16	14:20	–

Исходя из результатов можно сделать вывод, что для рассматриваемого рудника рекомендуемыми и достаточными мероприятиями для обеспечения безопасности реверсирования в холодное время являются утепление крепи и организация камер временного пребывания вблизи вентиляционного ствола. В применении калориферного оборудования нет необходимости, так как условия ведения горных работ обеспечивают безопасный подход к вентиляционному стволу в течение 14 часов 20 минут.

### Заключение

Возникновение аварийной ситуации, требующей реверсирования вентиляционной струи, может привести к подаче холодного воздуха в рудник при условии отсутствия систем подогрева воздуха на вентиляционных стволах. Эвакуация людей по запасным выходам при этом сопровождается риском для здоровья и жизни за счёт влияния холодного воздуха. В связи с этим необходима разработка компенсирующих мероприятий, обеспечивающих безопасность эвакуации и ведения спасательных работ.

В статье рассмотрен подход к выбору компенсирующих мероприятий для обеспечения безопасной эвакуации горнорабочих, основанный на натурных замерах, теплофизическом моделировании и оценке влияния холодного воздуха на человека. Для выбора мероприятий разработана матрица условий применения, которая использована на практике при исследованиях подачи холодного воздуха при реверсировании на одном из рудников северной части Красноярского края. По результатам исследования для рассматриваемых условий рекомендуется применение таких мероприятий, как утепление клетки и организация камер временного пребывания вблизи вентиляционного ствола.

Таким образом, для более точного выбора мероприятий, обеспечивающих безопасность людей при эвакуации во время реверсирования в холодное время года, необходима оценка возможного влияния холодного воздуха на отдельных этапах эвакуации для каждого отдельного запасного выхода. Данный подход позволяет выбрать достаточный комплекс мероприятий и исключить излишние затраты при их реализации. Также стоит учитывать, что климатические, геологические и технические условия ведения горных работ и условия эвакуации на каждом руднике уникальны, поэтому для выбора компенсирующих мероприятий для новых объектов необходимы отдельные исследования.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников: автореф. дис. ... д.т.н. 25.00.20: защищена 29.04.10 / Левин Лев Юрьевич. – Пермь, 2010. – С. 24-32.



2. Кормщиков Д.С., Кузьминых Е.Г., Семин М.А. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.
3. Зайцев А.В., Кузьминых Е.Г., Ольховский Д.В. Безопасность реверсирования воздушных потоков в шахтах и рудниках в холодное время года // Вестник государственной экспертизы. – 2022. – № 1. – С. 66-73.
4. Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Повышение безопасности эвакуации горнорабочих через вентиляционные стволы во время реверсирования воздушной струи в холодное время года на глубоком руднике // Горное эхо. – 2022. – № 3 (88). – С. 74-80. – DOI: 10.7242/echo.2022.3.12.
5. Семин М.А., Князев Н.А., Кормщиков Д.С. Тепловые процессы в вентиляционном стволе глубокого рудника при реверсировании воздушной струи в холодное время года // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2023. – № 1. – С. 112-123. – DOI: 10.15372/FTPRPI20230111.
6. Колесов Е.В., Семин М.А., Казаков Б.П., Князев Н.А. Совершенствование метода расчета коэффициента теплоотдачи шахтного вентиляционного ствола по данным экспериментальных измерений в реверсивном режиме проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2023. – № 3. – С. 57-71. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2023\_3\_0\_57.
7. Левин Л.Ю., Семин М.А. Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2019. – № 2. – С. 120-130. – DOI:10.15372/FTPRPI20190214.
8. Levin L.Y., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations // Journal of Mining Science. – 2014. – V. 50, № 2. – P. 371-378. – DOI: 10.1134/S1062739114020203.
9. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опублик. 20.02.2015. – 1 с.
10. РД 15-11-2007. Методические рекомендации о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях / Фед. служба по экологич., технологич. и атомному надзору. – М.: НТЦ «Пром. безопасность», 2007. – 57 с.
11. МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях: утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 19.09.2006. – 20 с.
12. Кормщиков Д.С., Кузьминых Е.Г., Семин М.А. Безопасность реверсирования воздушного потока в вентиляционных стволах шахт в холодное время года при отсутствии подогрева // Безопасность труда в промышленности. – 2022. – № 1. – С. 14-19. – DOI: 10.24000/0409-2961-2022-1-14-19.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.4.16

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СЕТЕЙ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ

С.В. Мальцев

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

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

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