

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2024.2.17

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОТСТАВАНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОВЕТРИВАНИЯ ТУПИКОВОЙ ВЫРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАГНЕТАТЕЛЬНОГО СПОСОБА

А.В. Таций

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В настоящей работе представлены и проанализированы три количественных показателя эффективности проветривания тупиковой горной выработки с использованием нагнетательного способа. Предложенные показатели позволяют комплексно оценить эффективность проветривания, как на качественном, так и количественном уровне. Для построения и валидации расчетной модели использованы исходные данные, полученные в результате замеров на руднике «Купол». В результате выполненной работы получены аппроксимирующие зависимости, позволяющие подобрать параметры величины отставания или скорость в вентиляционном трубопроводе для эффективного проветривания тупиковой выработки. Результаты исследования могут быть применены в качестве обоснования для увеличения отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя на различных рудниках.

**Ключевые слова:** рудник, тупиковая выработка, нагнетательный способ проветривания, воздухообмен, эффективное проветривание, безопасность.

### Введение

В процессе ведения горных работ в тупиковых горных выработках необходимо обеспечить эффективный вынос выделяющихся вредных примесей. Эффективность удаления вредных примесей из забоя может быть исследована только при понимании структуры воздушных турбулентных потоков [1,2].

Актуальность данной работы заключается в потребности качественной и количественной оценки эффективности проветривания тупиковых выработок, в зависимости от различных факторов.

Также полученные результаты могут быть использованы для обоснования увеличения отставания вентиляционного трубопровода от груди забоя до величин более 15 метров [3]. Последняя величина согласно правилам безопасности является предельно-допустимой величиной отставания вентиляционного трубопровода для тупиковых выработок сечением 16 м<sup>2</sup> и более. Обоснование увеличения отставания вентиляционного трубопровода позволит увеличить энергоэффективность проветривания и скорость ведения горных работ [4,5,6].

Так как натурные исследования, позволяющие понять и оценить структуру турбулентного движения воздуха, с практической точки зрения чрезвычайно затратны во времени и в материальных ресурсах, то с целью дальнейшей параметризации модели, в качестве инструмента для изучения турбулентной структуры, используется метод численного моделирования [7,8].

### Разработки модели

Для построения и валидации расчетной модели в программном комплексе Ansys Fluent использованы исходные данные, полученные в результате замеров на руднике «Купол» [9]. Некоторые геометрические параметры модели представлены на рис. 1.

Исходя из результатов предварительного моделирования, выбор был сделан в пользу модели RKE (k-epsilon realizable) на основе её способности обеспечивать наилучшую сходимость и стационарность решения [10,11]. С целью учета влияния высоких градиентов скорости вблизи стенок горной выработки и трубопровода на турбулентный поток сетка была уплотнена вблизи стенок выработки и вентиляционного трубопровода.

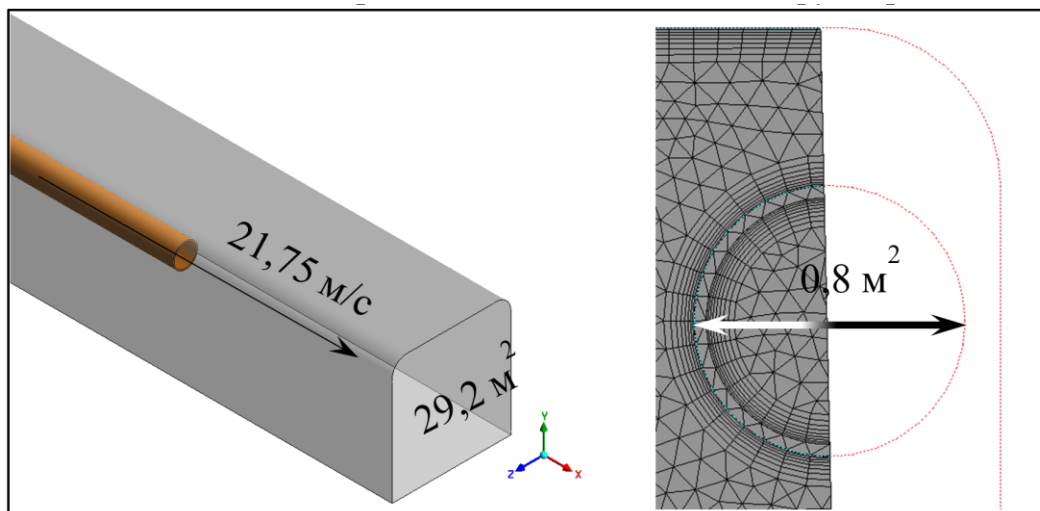


Рис. 1. Геометрические параметры исследуемой выработки

Численное моделирование проводилось при пороговом значении абсолютных невязок в  $10^{-5}$ , количество итерации 12 500. Такая маленькая величина порогового значения абсолютных невязок связана с тем, что в рассматриваемой задаче турбулентные потоки характеризуются высокой сложностью и большими градиентами, что предъявляет более высокую точность к расчетам для корректного воспроизведения физических особенностей потока воздуха.

### Показатели эффективности проветривания

На рис. 2 показана упрощенная схема нагнетательного проветривания тупиковой выработки, показывающая прямые и возвратные потоки воздуха, а также работающую технику, отравляющую атмосферу призабойного пространства. Поэтому основной задачей при проветривании является эффективное удаление вредных примесей, выделяемых в процессе ведения горных работ [12].

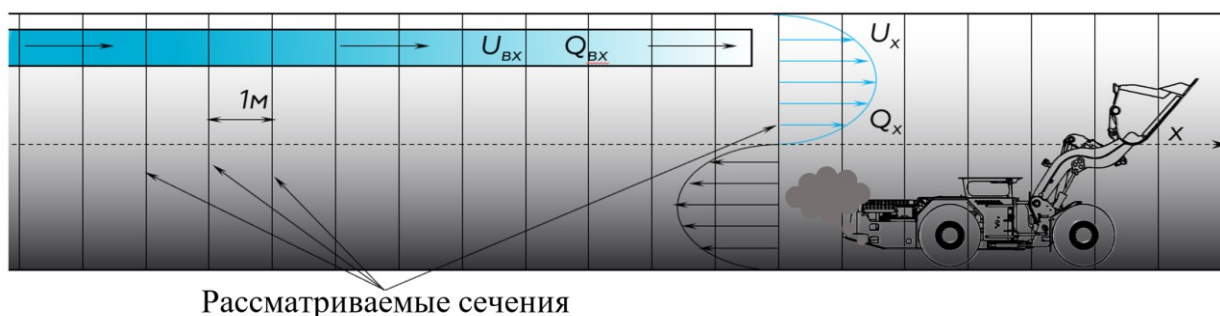


Рис. 2. Упрощенная схема нагнетательного проветривания тупиковой выработки

Это возможно только в том случае, если обеспечить доставку свежего воздуха, а также вынос отработанного воздуха из призабойного пространства. Оценка интенсивности этого процесса может быть проведена с помощью показателя «относительная величина потока воздуха направленного к груди забоя». Определяется данный показатель отношением расхода воздуха направленного к груди забоя к входящему расходу воздуха, поступающему на проветривание тупика.

Свежий воздух надо не только доставить до забоя, но и обеспечить его перемешивание с выделяющимися вредностями. Для характеристики данного процесса перемешивания

вания введен второй показатель – он выражается параметром максимальной продольной скоростью потока воздуха, отнесенной к средней скорости в трубопроводе.

Самым трудным местом при проветривании является узкая зона вблизи груди забоя, поэтому также важно дополнительно оценить эффективность омывания воздухом забоя – это можно сделать с помощью третьего показателя – максимальной поперечной скорости потока воздуха.

Все описанные показатели собраны в табл. 1, вместе с соответствующим им физическими процессами и параметрами для количественной оценки. Индекс «x» в данном случае соответствует продольной координате выработки, а индексы «y» и «z» - поперечным.

Таблица 1

## Показатели эффективности проветривания

№	Процесс	Показатель	Расчетная формула
1	Доставка свежего воздуха, вынос отработанного воздуха	Относительная величина потока воздуха к груди забоя	$\frac{Q}{Q_{\text{вх}}}$
2	Перемешивание масс воздуха	Относительная максимальная скорость потока	$\frac{U_{\text{max}(x)}}{U_{\text{вх}}}$
3	Омывание забоя	Максимальная поперечная скорость потока	$U_{\text{max}(y,z)}$

Расчет всех представленных показателей производился в поперечных сечениях горной выработки с интервалом в 1 метр.

## Результаты моделирования

Результаты, полученные в ходе моделирования и представленные на рис. 3, выражены зависимостью величины спутного потока воздуха, направленного к груди забоя, от расстояния между концом вентиляционного трубопровода и грудью забоя.

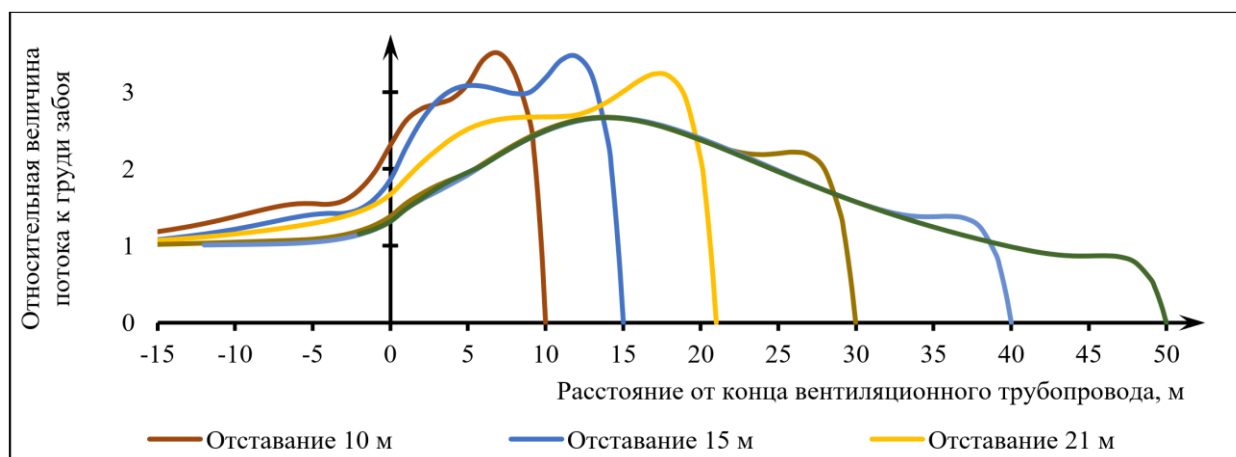
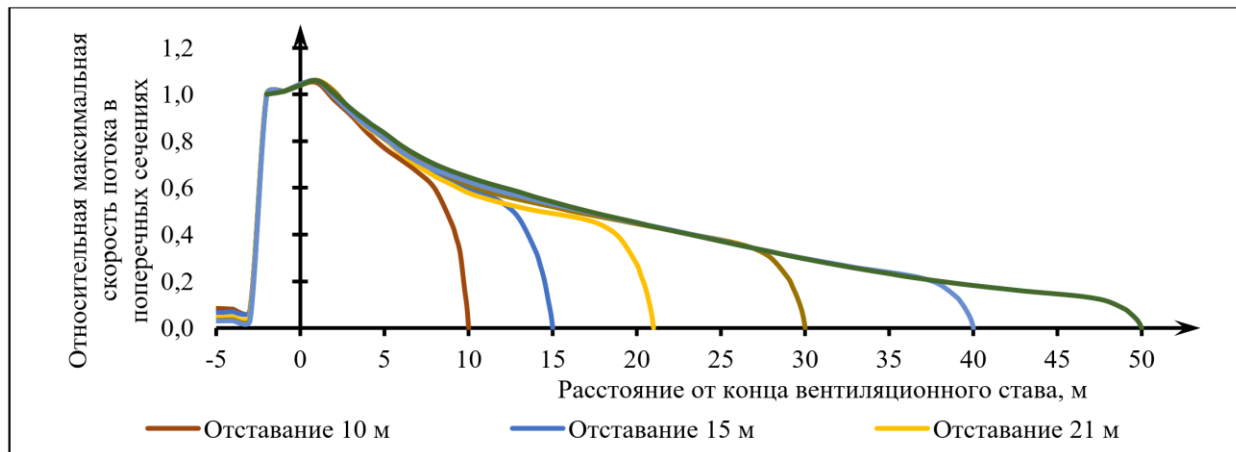


Рис. 3. Относительная величина потока к груди забоя при различном отставании трубопровода от груди забоя

Для случаев отставаний 15-25 м на кривых можно отметить два локальных максимума. Наличие сразу двух максимумов связано со сложной структурой стационарного вихря, формирующегося в призабойной зоне, это говорит о «закрученности» данного вихря в направлении оси горной выработки.

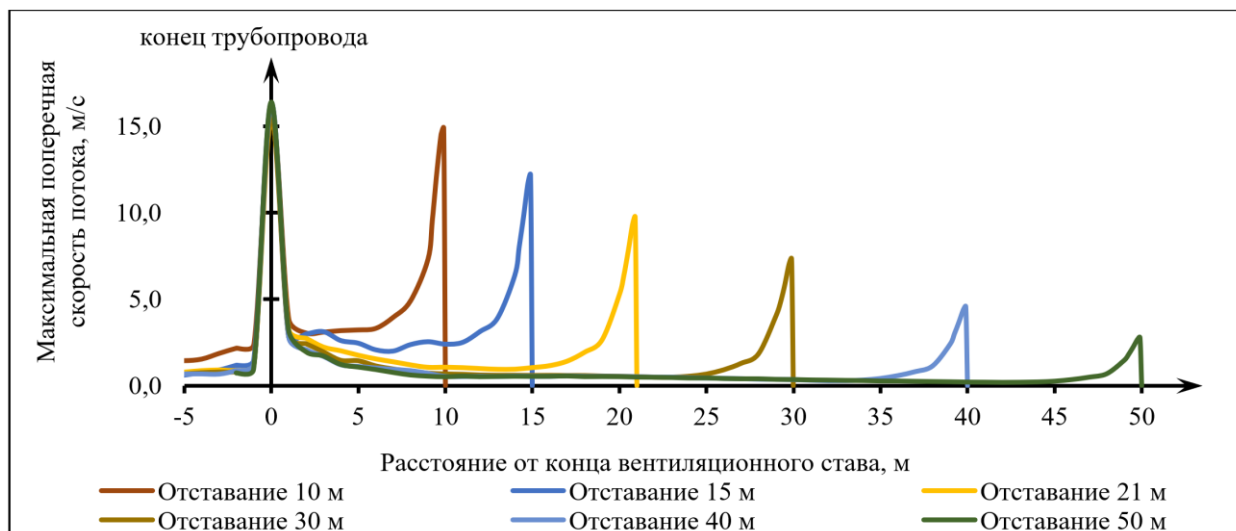
Второй рассматриваемый показатель представлен кривыми, выраженными зависимостью относительной максимальной скорости при различном отставании вентиляционного трубопровода. Результаты наглядно указывают, что при отставании трубопровода до 25 м резкое затухание турбулентного потока воздуха происходит непосредственно у груди тупикового забоя (рис. 4).



**Рис. 4.** Относительная максимальная скорость потока в поперечных сечениях при различном отставании трубопровода от груди забоя

При росте удаления трубопровода от забоя относительная максимальная скорость начинает плавно угасать по всей длине тупиковой выработки близко к линейному закону до самого забоя.

Третий показатель (максимальная поперечная скорость потока) представлен на рис. 5. По экстремумам кривых, построенных для различных отставаний, можно оценить длину и величину возникающего стационарного вихря.



**Рис. 5.** Максимальная поперечная скорость потока при различном отставании трубопровода от груди забоя

Оценить длину вихря можно по максимумам, которые показывают, что в не зависимости от отставания вихрь возникает у конца вентиляционного трубопровода, а кончается непосредственно у груди тупикового забоя.

На рис. 6 представлены примерно линейные функции трех показателей от отставания на расстоянии 1 метр от груди забоя в определенном диапазоне отставаний. Приведенное расстояние обосновано с точки зрения зоны дыхания человека, находящегося в призабойной части выработки. Комплексный анализ безусловно позволяет оценить снижение воздухообменных процессов с ростом отставания вентиляционного трубопровода.

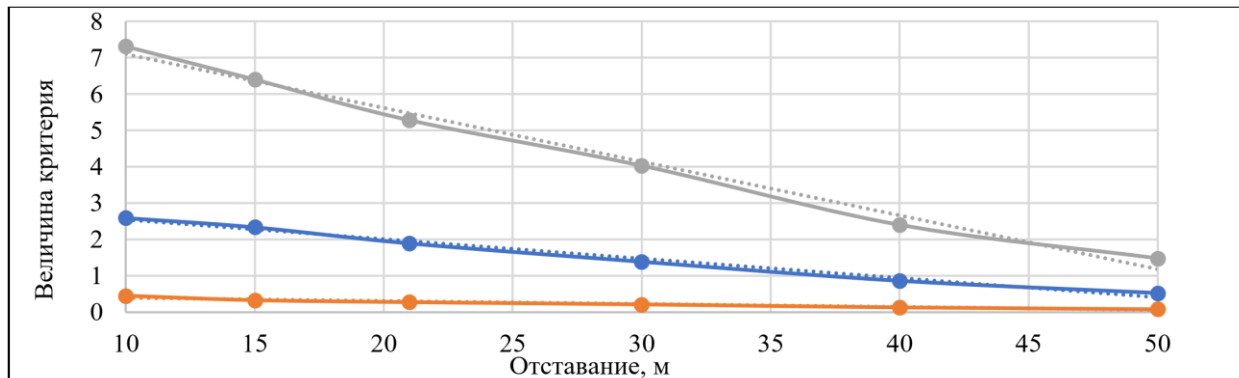


Рис. 6. Комплексный анализ представленных показателей с их линейными аппроксимациями

Построенные зависимости и их линейные аппроксимации указывают на то, что показатели подобны, это в свою очередь говорит об их согласованности. Они предсказывают одинаковое ухудшение или улучшение качества проветривания при изменении отставания.

Аналогичным образом построены графики рис. 7 при изменении скорости входящего потока воздуха. При вариации скорости принималось, что знаменатель выражений из табл. 1 неизменен и соответствует референтной скорости воздуха в вентиляционном трубопроводе (21,75 м/с), а изменяется только числитель. Это сделано для того, чтобы оценить изменение размерных характеристик массопереноса в выработке при изменении количества подаваемого по трубопроводу воздуха. Отмечается, что предложенные показатели примерно пропорциональны скорости.

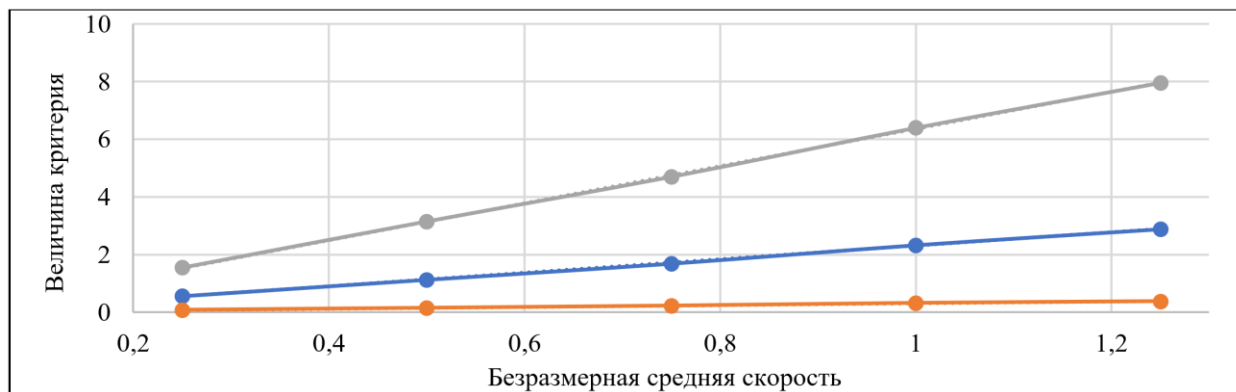


Рис. 7. Комплексный анализ представленных показателей с их линейными аппроксимациями при изменении средней скорости входящего потока воздуха

Данные линии получены при отставании трубопровода 15 м, подобные графики также строились и для других отставаний.

Проведенное моделирование позволило в конечном счете вывести аппроксимирующую зависимость всех показателей от двух параметров: скорости потока воздуха и отставания трубопровода, тем самым мы получили формулы, указанные в табл. 2.

**Таблица 2**

Количественная оценка показателей эффективности проветривания в 1 м от забоя

Показатели оценки эффективности проветривания	Аппроксимирующая зависимость
Относительная величина потока воздуха к забою на расстоянии 1 метр от забоя	$0,286(10,73 - L') \frac{V}{V_0}$
Относительная максимальная скорость потока в поперечном сечении на расстоянии 1 метр от забоя	$0,044(10,73 - L') \frac{V}{V_0}$
Величина максимальной поперечной скорости потока в поперечном сечении на расстоянии 1 метр от забоя	$0,798(10,73 - L') \frac{V}{V_0}$

Полученные зависимости позволяют сказать о том, что высокая скорость свежего потока воздуха, поступающего на проветривание, компенсирует увеличенное отставание трубопровода от груди забоя и наоборот.

На практике полученные результаты могут позволить обеспечить эффективное проветривание тупиковых горных выработок после производства взрывных работ, обеспечив сохранность трубопровода, увеличив отставание трубопровода от груди забоя.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения (рег. номер НИОКТР 124020500030-7).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С. О возможности проветривания тупиковых выработок беструбным способом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 195-199.
2. Казаков Б.П., Колесов Е.В., Накаряков Е.В., Исаевич А.Г. Обзор моделей и методов расчета аэродинамических 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. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
4. Козырев С.А., Амосов П.В. Обоснование минимального расстояния от забоя проводимой выработки до конца вентиляционных труб // Безопасность труда в промышленности. – 2012. – №. 10. – С. 79-84.
5. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Паршаков О.С., Богомятков А.В. Улучшение проветривания тупиковой выработки путем увеличения начальной скорости воздуха в вентиляционной струе // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2022. – № 1. – С. 112-118. – DOI: 10.15372/FTPPI20220112.
6. Мостепанов Ю.Б. Исследование дальнобойности стесненной струи, действующей в забое тупиковой выработки // Изв. вузов. Горн. журн. – 1978. – № 11. – С. 47-50.
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Гришин Е.Л. Эжектирование возвратного потока воздуха для увеличения дальнобойности направленной в тупик воздушной струи // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2022. – Т. 333. – № 9. – С. 27-36. – DOI: 10.18799/24131830/2022/9/3624.
8. Колесов Е.В., Казаков Б.П. Эффективность проветривания тупиковых подготовительных выработок после взрывных работ // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2020. – Т. 331. – № 7. – С. 15-23. – DOI: 10.18799/24131830/2020/7/2715.

9. Каменских А.А., Файнбург Г.З., Семин М.А., Таций А.В. Экспериментальные исследования проветривания тупиковой выработки нагнетательным способом при различном отставании вентиляционного трубопровода от груди забоя // Горные науки и технологии. – 2024. – Т. 9, № 1. – С. 41-52. – DOI: 10.17073/2500-0632-2023-08-147.
10. Левин Л.Ю., Газизуллин Р.Р., Зайцев А.В. Использование программного модуля Ansys CFX при решении научно-производственных задач проветривания шахт и рудников // САПР и графика. – 2011. – № 10. – С. 64-66.
11. Колесов Е.В., Казаков Б.П., Кузьминых Е.Г. Моделирование процесса изменения состава рудничного воздуха в наклонной тупиковой горной выработке // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 79-84. DOI: 10.7242/echo.2020.1.17.
12. Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 179-184.

**Журнал  
ГОРНОЕ ЭХО**

Научно-техническое издание

**Учредитель**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Пермский федеральный исследовательский центр  
Уральского отделения Российской академии наук – ПФИЦ УрО РАН

614990, г. Пермь, ул. Ленина, д. 13а, тел. (342) 212-60-08

**Издатель**

Горный институт УрО РАН – филиал ПФИЦ УрО РАН

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А; тел. (342) 216-75-02

**Техническое редактирование** В.В. Трескова  
**Верстка** А.Б. Баталин

Подписано в печать 10.08.2024. Формат 60\*84/8. Бумага ВХИ. Гарнитура Таймс.  
Усл. печ. л. 11,39. Тираж 100 экз. Заказ №\_\_\_\_\_. Бесплатно. Дата выхода в свет 20.08.2024

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,  
информационных технологий и массовых коммуникаций (РОСКОМНАДЗОР)  
(Свидетельство ПИ № ФС77-75332 от 25.03.2019 г.)

**Адрес редакции:**

614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-А; тел. (342) 216-75-02;  
e-mail: arc@mi-perm.ru; www.mi-perm.ru

**Отпечатано в типографии IQ.PRESS**

614046, г. Пермь, ул. Барамзиной 42/3, тел.: +7 (342) 240-36-70  
e-mail: zakaz@iqpress.ru, www.qpress.ru