

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ШАХТНОЙ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ РУДНИКА НОРИЛЬСКОГО ПРОМЫШЛЕННОГО РАЙОНА

О.С. Паршаков

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе приводятся результаты детального экспериментального обследования системы вентиляции рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель». Кроме разработки традиционных технических решений, направленных на обеспечение потребителей требуемым количеством воздуха, в ходе изучения вентиляционной сети рудника дополнительно проведены теоретические исследования тепломассопереноса в горных выработках. Результаты теоретических исследований, полученные на базе экспериментальных данных и основанные на научном подходе к проведению полевых работ, позволили объяснить интересные физические явления, происходящие в подземных условиях рудника.

**Ключевые слова:** рудник, полевые работы, экспериментальные данные, теоретические исследования, вентиляционная сеть, параметры воздуха, вентиляторная установка.

### Введение

Компания «Норильский никель» – лидер горно-металлургической промышленности в мире. Ключевой ресурсной базой компании является Заполярный филиал (ЗФ), который расположен на Таймырском полуострове за Полярным кругом и относится к Норильскому промышленному району. В состав филиала входят 5 рудников: «Таймырский», «Октябрьский», «Комсомольский», «Скалистый» и «Маяк», разрабатывающие крупнейшие Октябрьское и Талнахское медно-никелевые месторождения. На предприятиях Заполярного филиала производится 85% российских никеля и кобальта, около 70% меди и более 95% металлов платиновой группы [1]. При этом Норильский никель регулярно проводит геологоразведочные работы на месторождениях Талнахского рудного узла в целях увеличения ресурсного потенциала, а следовательно увеличения производственной мощности горных предприятий по добыче руды. Как результат в отработку вовлекаются новые участки месторождений. Это приводит к перераспределению воздуха, поступающего на проветривание, как по отдельным рабочим горизонтам, так и по руднику в целом.

Определение основных параметров вентиляционной сети рудника, схемы его проветривания, выбор оптимальных режимов работы вентиляторных установок, разработка рекомендаций по развитию вентиляционной сети с указанием необходимых вентиляционных устройств и порядку выполнения работ по контролю состава и запыленности рудничной атмосферы, а также множество других задач требуют научного подхода в части обеспечения и улучшения проветривания рудников с учетом их перспективного развития.

В связи с этим по заданию Заказчика научными организациями проводится широкий комплекс работ, предусматривающий разработку технических решений по обеспечению проветривания рудников с учетом увеличения их производительности и, соответственно, возрастания нагрузок на вентиляционно-калориферное хозяйство. Следует отметить, что результаты, полученные на основе теоретических и экспериментальных исследований шахтных вентиляционных сетей, включают в разделы проектной документации по комплексному развитию горного производства.

Таким образом, в целях разработки технических решений по обеспечению проветривания рудника «Октябрьский» ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» с учетом

максимально возможного объема добычи в начале 2020 года специалистами «ГИ УрО РАН» проведены экспериментальное обследование и теоретическое исследование системы вентиляции подземных горных выработок. Результаты работы позволили определить перспективы развития рудника по условиям вентиляции и разработать наиболее энергоэффективные мероприятия по улучшению состояния его проветривания [2].

В настоящей статье приводится обобщение наиболее значимых, а также новых результатов исследования шахтной вентиляционной сети рудника «Октябрьского».

### Краткие сведения о руднике «Октябрьский»

Рудник «Октябрьский» расположен на Таймырском полуострове вблизи района Талнах, который находится в 25 километрах к северу от г. Норильска и соединен с городом автомобильной и железной дорогами. В пределах шахтного поля рудника выделяются три промышленных типа медно-никелевых руд на глубинах от 450 м до 1050 м – богатые (сплошные), вкрапленные в интрузии и медистые (прожилково-вкрапленные во вмещающих интрузив породах).

Годовая производственная мощность добычи руды составляет 5 100 000 т. Вскрытие залежи обрабатываемых руд осуществляется одиннадцатью вертикальными стволами, откаточными горизонтами и соответствующими им вентиляционно-закладочными горизонтами. Добычу руды в горных выработках рудника осуществляют 9 подземных участков. Общая протяженность действующих выработок рудника более 310 км.

Основные характеристики рудника по вентиляции приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные характеристики рудника по вентиляции

Способ проветривания	всасывающий
Схема проветривания	фланговая
Количество главных вентиляторных установок	4 шт.
Максимальная производительность главных вентиляторных установок	2 680 м <sup>3</sup> /с при 3 750 Па
Требуемое количество воздуха для проветривания рудника	1 335 м <sup>3</sup> /с
Пропускная способность стволов *	1 992 м <sup>3</sup> /с
Количество замерных станций	114 шт.

\* – количество воздуха, определяемое исходя из ограничений максимально-допустимой скорости в стволах (по ФНП ПБ)

### Объем экспериментальных и теоретических исследований

В рамках экспериментальных исследования шахтной вентиляционной сети рудника «Октябрьский» проведены полевые работы, включающие в себя детальные воздушно-депресссионную, температурно-влажностную, газовую и пылевую съемки.

Для выполнения натурных замеров использовались следующие приборы:

- рудничные взрывозащищенные анемометры АПР-2 крыльчатого типа с автономным питанием, производитель НПФ «Экотехинвест»;
- лазерные дальнометры DISTO D, производитель Leica;
- прецизионные портативные цифровые барометры DPI-740, производитель Druck;

- термовлагомеры Fluke-971, производитель Fluke;
- газоанализаторы портативные X-am 2000, X-am 5000, X-am 5600 Pac 7000, производитель Drager;
- газоанализаторы портативные ALTAIR 4X, производитель MSA;
- аспираторы сильфонные AM-0059, производитель НПФ «СЕРВЭК»;
- индикаторные трубки, производитель НПФ «СЕРВЭК»;
- анализатор пыли CEL-712 Microdust Pro, производитель Casella.

При проведении полевых работ в условиях подземных горных выработок выполнено более 3 000 натуральных измерений, зафиксированы все непроходимые выработки рудника, на промышленных площадках рудника выполнено обследование всех вентиляторных установок и комплексов надшахтных зданий.

В таблице 2 представлен объем экспериментальных исследований.

Таблица 2

Объем экспериментальных исследований

Количество шахтных замеров, шт.	
– площадь выработки	913
– скорость движения воздуха	913
– абсолютное движение воздуха	296
– температура воздуха	431
– относительная влажность воздуха	378
– концентрация газов	635
– концентрация пыли	103
Суммарная длина непроходимых горных выработок, м	24 770 (8 %*)
Количество обследованных вентиляторных установок главного проветривания и вентиляторных агрегатов калориферных установок	17 шт.
Количество обследованных комплексов надшахтных зданий	12 шт.

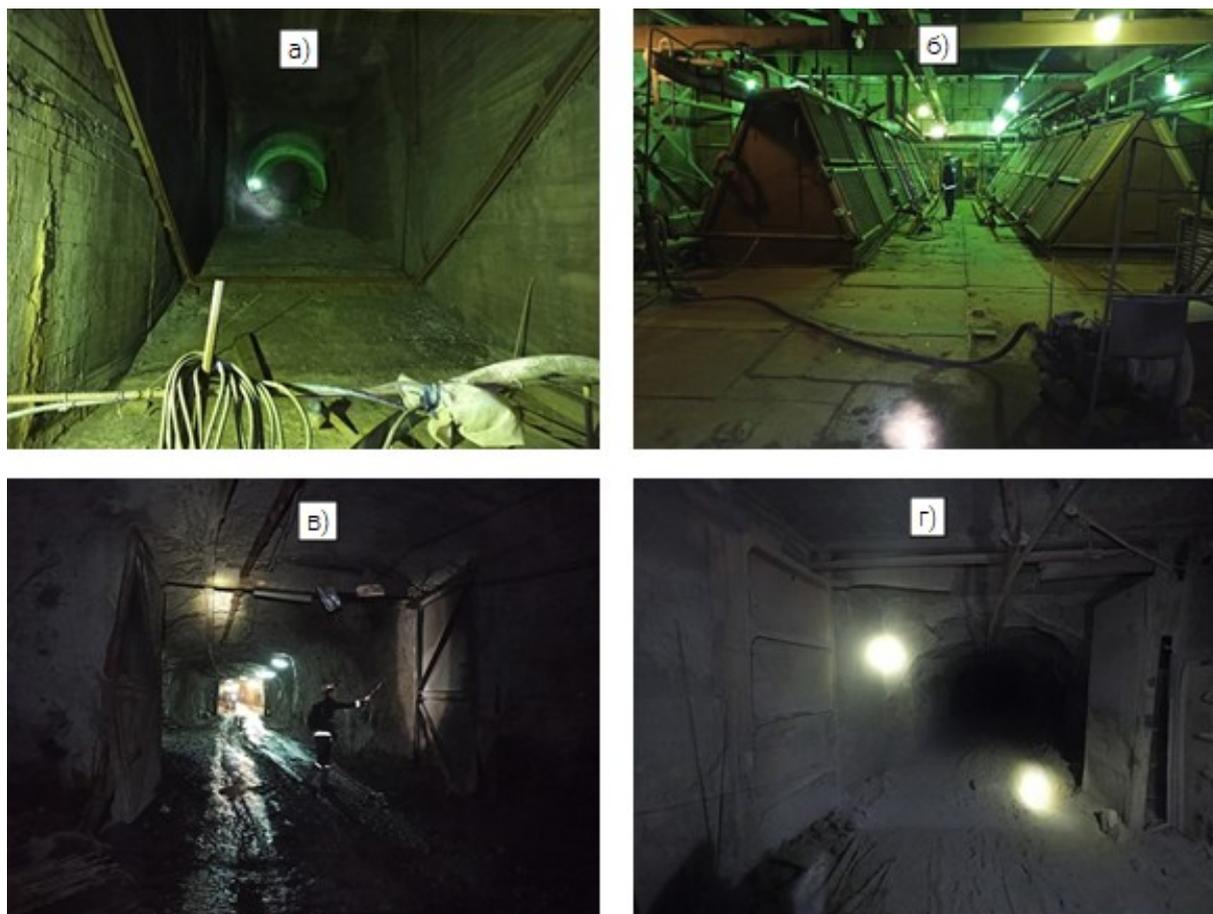
\* – доля непроходимых выработок от общей протяженности выработок рудника

На рисунке 1 представлены фотоснимки, полученные в результате обследования элементов вентиляционной сети рудника «Октябрьский».

На основании экспериментальных данных первоначально в программном комплексе «АэроСеть» [3] разработана модель шахтной вентиляционной сети рудника «Октябрьский» с учетом фактических 3D координат осевых линий выработок, действующих на дату проведения полевых работ. Следует отметить, что топологическая схема разработанной модели рудника содержит более 5 500 выработок, общая протяженность которых достигает более 310 километров.

Упрощенная топология расчетной модели вентиляционной сети рудника приведена на рисунке 2.

При помощи вентиляционной модели выполнен анализ текущего состояния проветривания рудника, определены оптимальные режимы совместной работы комплекса вентиляторных установок, произведен расчет устойчивости проветривания рабочих зон, проведен анализ распределения энергозатрат на вентиляцию, исследовано влияние естественной тяги на проветривание рудника, рассчитаны вентиляционные режимы, предусмотренные планом мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий, и многое другое.



**Рис. 1.** Фотоснимки элементов вентиляционной сети рудника  
а) вентиляционный канал воздухоподающего ствола; б) калориферные установки;  
в) замер скорости воздуха в подземной выработке; г) противопожарные двери

### **Основные результаты исследования вентиляционной сети**

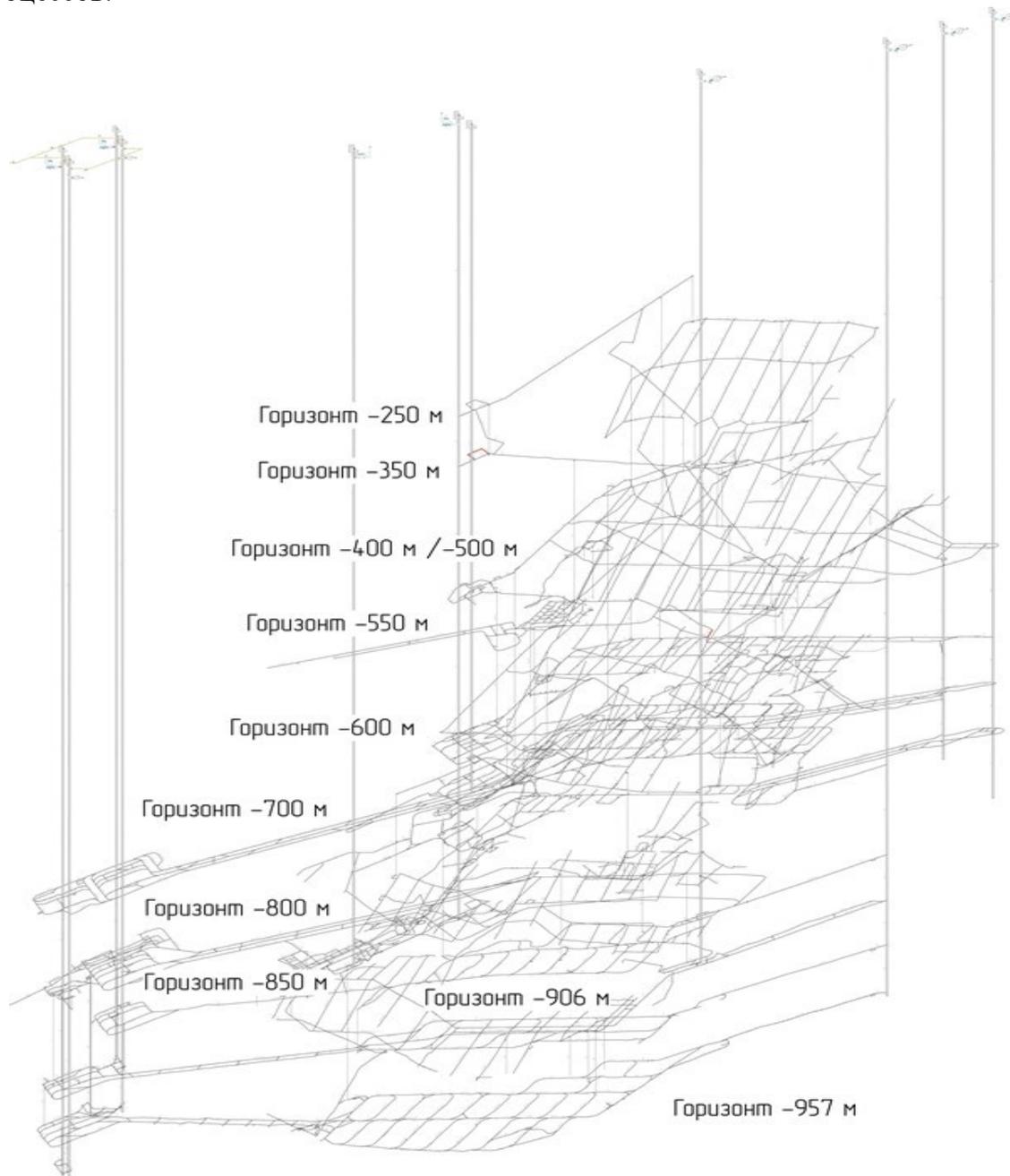
Традиционно изучение шахтных вентиляционных сетей заключается в проведении воздушно-депресссионной съемки (ВДС) в эксплуатируемых подземных горных выработках. Стандартный перечень работ ВДС регламентируется п. 189 ФНиП ПБ [4]. В ходе исследования вентиляционной сети рудника «Октябрьский», кроме разработки традиционных технических решений, направленных на обеспечение потребителей требуемым количеством воздуха, дополнительно на основании значительного объема экспериментальных данных проведено изучение вызывающих интерес физических явлений.

Основные интересные результаты с точки зрения научного подхода к проведению полевых работ в условиях подземных горных выработок приведены ниже.

#### *Формирование микроклимата в обводненных стволах глубокого рудника*

Результаты натурных измерений температуры и относительной влажности воздуха, поступающего по воздухоподающим стволам в холодный период года, показали следующее: при опускании по стволу воздуха, нагретого калориферными установками, происходит его охлаждение [5]. При этом давно известно и доказано: при движении воздуха вниз по стволу в поле действия тяжести происходит его значительный разогрев, который хорошо описывается линейным законом [6, 7]. Анализ экспериментальных исследований позволил установить, что на термодинамическое состояние подготовленного воздуха влияет ряд факторов; основными для

условий шахтных стволов рудника «Октябрьского» являлись процессы тепло- и массообмена. В связи с этим была разработана математическая постановка задачи тепломассообмена поступающего воздуха с окружающей его средой. Расчеты теплораспределения в воздухоподающем стволе, выполненные на основании параметризованной математической модели позволили описать и объяснить эффект понижения температуры воздуха в воздухоподающих стволах в условиях глубоких рудников. В таблице 3 представлено соотношение влияния тепломассообменных процессов.



**Рис. 2.** Упрощенная топология модели вентиляционной сети рудника

Таким образом, результаты моделирования показали, что при наличии водопритоков в стволы из закрепного пространства – компенсация нагрева воздуха за счет гидростатического сжатия происходит вследствие совместного действия двух процессов: теплообмена воздуха с влажной крепью ствола и конвективного теплопере-

носа за счет отрыва капельной влаги. Влияние испарения влаги с поверхности крепи пренебрежимо мало [8].

Таблица 3

Соотношение влияния тепломассообменных процессов

Фактор	Влияние, %			
	Стволы рудника № 1			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
Теплообмен с влажной крепью ствола	332,5	127,2	489,5	480,0
Испарение влаги с поверхности крепи	1,9	1,1	18,1	18,7
Конвективный теплоперенос за счет отрыва капельной влаги	78,6	82,8	23,8	106,7
Гидростатический нагрев воздуха	-313,0	-111,1	-431,4	-505,4

#### *Результаты расчета Бланкет-эффекта*

В вентиляционных стволах шахт и рудников в условиях высокой влажности восходящего воздушного потока может образовываться такое опасное явление как Бланкет-эффект или эффект водяной пробки [9].

В работе предполагается, что Бланкет-эффект возникает вследствие одновременного присутствия достаточно большого количества сконденсировавшейся капельной влаги в воздухе, восходящем по вентиляционному стволу. Как известно, давление и температура воздуха по мере его поднятия по стволу уменьшаются, вследствие чего из воздуха, относительная влажность которого изначально близка к 100%, выделяется влага. Конденсирующая влага будет объединяться в водяные капли. Капельная влага не может мгновенно покинуть ствол и потому в течение какого-то времени присутствует в стволе. Она может перемещаться как вниз, так и вверх по стволу в зависимости от соотношения веса каждой капли и аэродинамической силы, действующей на нее со стороны восходящего воздушного потока. В условиях, когда эти силы близки друг к другу по величине, капельной влаге требуется достаточно продолжительное время для того, чтобы покинуть вентиляционный ствол. При этом в стволе может присутствовать одновременно достаточно большое количество влаги. Воздух будет воспринимать на себя вес всей капельной влаги, находящейся в данный момент времени в стволе. Ввиду этого в стволе может происходить значительная потеря давления вследствие аэродинамического сопротивления со стороны движущихся в воздушном потоке водяных капель. Как следствие, происходит рост аэродинамического сопротивления ствола и прочие негативные последствия этого эффекта.

Для количественной оценки влияния Бланкет-эффекта на систему вентиляции рудника «Октябрьский» разработана одномерная модель вентиляционного ствола [10, 11]. Количественный расчет Бланкет-эффекта приведен в таблице 4.

Согласно расчетам, сделан вывод о том, что для условий рудника «Октябрьский» наличие Бланкет-эффекта не оказывает значительного влияния на депрессию вентилятора, а следовательно, и на проветривание рудника.

Таблица 4

Результаты расчета Бланкет-эффекта для одномерной модели

Параметр	Вентиляционный ствол № 1	Вентиляционный ствол № 2	Вентиляционный ствол № 3	Вентиляционный ствол № 4
Площадь сечения ствола, м <sup>2</sup>	33,2	33,2	33,2	33,2
Расход воздуха в стволе, м <sup>3</sup> /с	405,4	282,6	39,9	232,1
Скорость воздуха, м/с	12,2	8,5	1,2	7,0
Температура воздуха на сопряжении с горизонтом, °С	15	17	20	19
Температура воздуха на сопряжении с каналом ГВУ, °С	13,6	14,3	14,5	14,0
Максимальная депрессия вентилятора, затрачиваемая на преодоление дополнительного сопротивления, обусловленного выпадением влаги, Па	87	110	Бланкет-эффект не возникает	157

#### *Влияние влаги на аэродинамические параметры*

Дополнительно произведен анализ изменения влагосодержания воздушной струи при движении по горным выработкам для определения величины влияния процесса переноса влаги на увеличение аэродинамического сопротивления вентиляционной сети рудника «Октябрьский».

Для этого на основании шахтных измерений установлено, что влагосодержание воздуха, поступающего в рудник после систем воздухоподготовки в среднем не ниже 2 г/кг (соответствует температуре 12°С и относительной влажности 15%). Влагосодержание исходящей струи воздуха, поступающего в вентиляционные стволы в среднем не выше 12 г/кг (соответствует температуре 20°С и относительной влажности 80%). При общем массовом расходе воздуха, поступающего на проветривание рудника «Октябрьский», равном 1 249 кг/с (расчетная плотность воздуха 1,3 кг/м<sup>3</sup>), общая масса влаги, испаряемой с поверхности горных выработок и переносимой потоком воздуха, составляет 12,5 кг/с.

Поскольку коэффициент аэродинамического сопротивления горных выработок прямо пропорционален плотности текучей среды, то увеличение аэродинамического сопротивления горных выработок из-за повышения удельной массы воздуха вследствие увлажнения можно рассчитать следующим образом:

$$\Delta\alpha = \left( \frac{g_0 + g_B}{g_0} \right) \alpha,$$

где  $g_0$  – массовый расход воздуха без учета увлажнения, равен 1 249 кг/с;  $g_B$  – массовый расход испарившейся влаги, равен 12,5 кг/с;  $\alpha$  – коэффициент аэродинамического сопротивления горных выработок, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, относительное увеличение коэффициентов аэродинамического сопротивления горных выработок за счет увлажнения воздуха составляет не более 1%.

### Результаты температурно-влажностной съемки

Результаты температурно-влажностной съемки позволили определить характер изменения микроклиматических параметров воздуха при его движении от дневной поверхности до подземных рабочих зон. Термограмма по одному из трактов движения струи воздуха от поверхности до сопряжения вентиляционного ствола с каналом главной вентиляторной установки приведена на рисунке 3.

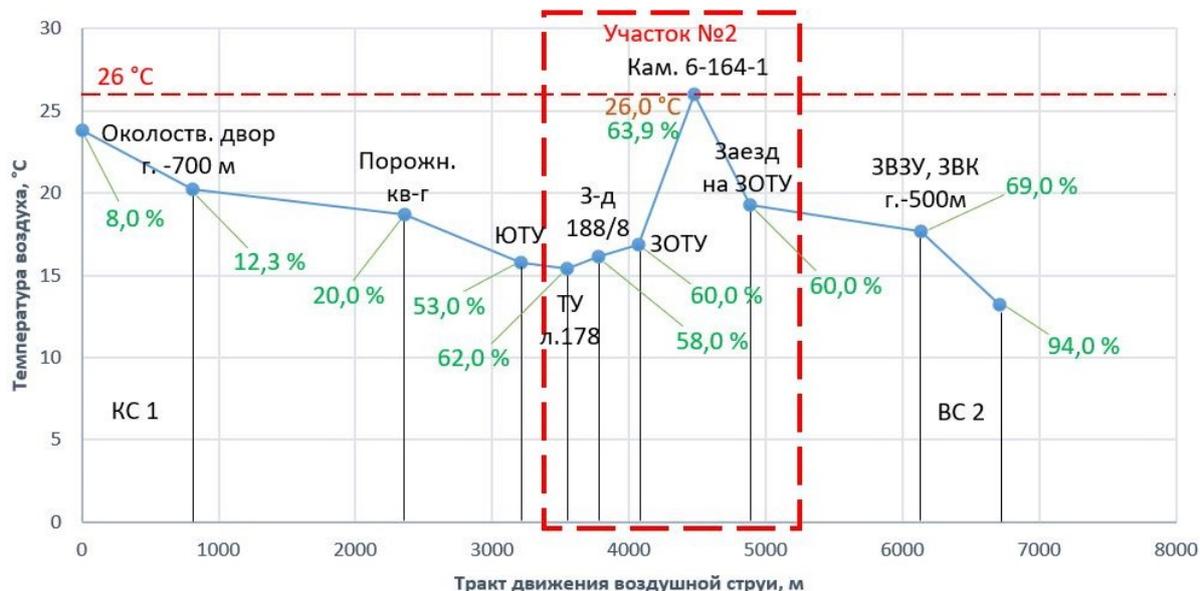


Рис. 3. Распределение температуры воздуха и его относительной влажности в подземных выработках рудника

В ходе проведенных замеров микроклиматических параметров воздуха зафиксированы превышения предельно-допустимого значения температуры  $+26^{\circ}\text{C}$  в ряде выработок. В связи с этим для интегральной оценки тепловой нагрузки среды горнорабочих рассчитан ТНС-индекс. Тепловая нагрузка среды (ТНС) – сочетанное действие на организм человека параметров микроклимата (температура, влажность, скорость движения воздуха, тепловое облучение), выраженное одночисловым показателем в  $^{\circ}\text{C}$ . Интегральный показатель ТНС-индекс определяют, чтобы обосновать необходимость проведения мероприятий по защите работников от возможного перегревания при наличии теплового облучения [12].

Рассчитанные величины ТНС-индекса показали, что для определенных категорий работ по уровню энергозатрат в рабочих зонах, где наблюдается превышение допустимой температуры воздуха, класс условий труда может относиться к опасному. Поэтому в целях точной оценки класса труда горнорабочих с учетом ТНС-индекса по результатам работы рекомендовано проведение дополнительных исследований, направленных на определение уровня энергозатрат работников.

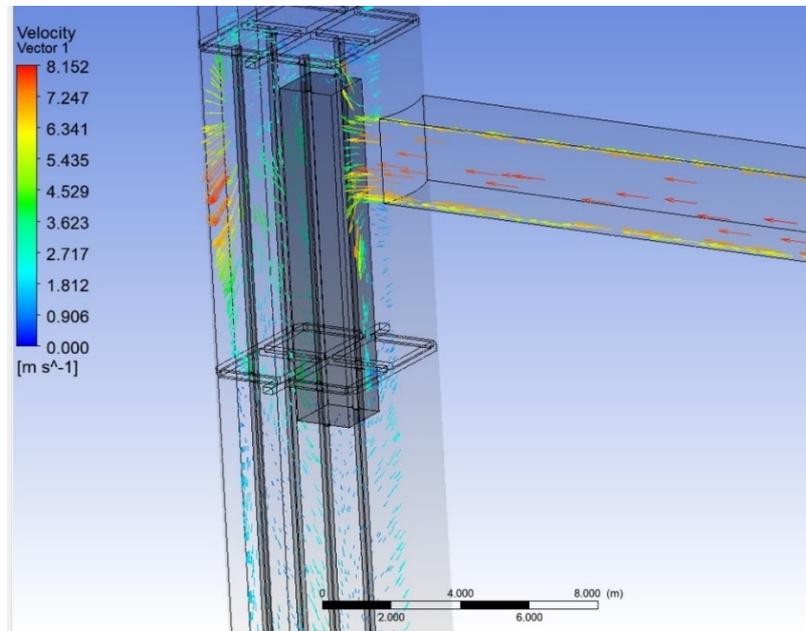
### Обоснование скоростей движения воздуха по скиповым стволам

В целях оценки возможности максимального задействования скиповых стволов рудника «Октябрьский» в проветривании подземных рабочих зон в работе проведено теоретическое исследование влияния скорости воздуха на аэродинамические нагрузки технологического оборудования в стволах.

На первом этапе выполнен анализ литературных источников, описывающих основные критерии по допустимым скоростям воздуха в стволах, предназначенных для спуска и подъема грузов. При высоких скоростях воздуха в стволах могут возникать следу-

ющие проблемы: гармонические колебания в канатах, вибрация подъемных сосудов и возможное их столкновение, стук об расстрелы [13].

На втором этапе разработана численная трехмерная модель реального участка скипового ствола. Для решения поставленных задач использовались вычислительные методы динамики жидкости и газа (CFD-методы). Пример с визуализацией результатов моделирования представлен на рисунке 4.



**Рис. 4.** Модельное распределение скорости движения воздуха в месте сопряжения вентиляционного канала и скипового ствола

Результаты теоретического исследования на основе многовариантного моделирования позволили определить максимально возможные аэродинамические нагрузки на технологическое оборудование, расположенное в скиповых стволах рудника «Октябрьский». Установлено, что аэродинамические нагрузки при максимальной скорости движения воздуха 15 м/с, регламентируемой правилами безопасности [3], являются незначительными.

Основным фактором, определяющим скорость движения воздуха по стволам, является фактор энергоэффективности. Установлено, что для фактического аэродинамического сопротивления стволов скорости, превышающие 9,0 м/с приводят к значительным энергозатратам, достигающим 25% от энергозатрат на поддержание расходов во всех остальных горных выработках. При скоростях подачи воздуха выше 15,0 м/с количество требуемой энергии в единицу времени только на проветривание стволов выше, чем энергозатраты по поддержание расходов воздуха во всех остальных ветвях модели. В связи с этим сделан вывод о нецелесообразности обоснования сверхнормативных скоростей воздуха, подаваемого по скиповым стволам.

Следует отметить, что в настоящей статье приводится лишь малая часть результатов исследований шахтной вентиляционной сети рудника «Октябрьский». Помимо приведенных основных результатов работы с точки зрения научной новизны, выполнено изучение влияния последовательного проветривания рабочих зон, определены оптимальные режимы совместной работы комплекса вентиляторных установок, проведен анализ энергоэффективности системы вентиляции рудника, исследовано влияние естественной тяги, выполнена оценка пылевой и газо-воздушной обстановки в подземных выработках.

## Выводы

Экспериментальные данные, полученные на основании детальных воздушно-депрессивной, температурно-влажностной, газовой и пылевой съемок, позволили разработать мероприятия по улучшению и совершенствованию состояния проветривания рудника «Октябрьский» с учетом текущего и перспективного развития горных работ.

Кроме этого, проведение широкого комплекса полевых работ дает возможность не только разработать традиционные технические решения по обеспечению требуемым количеством воздуха, но и получить новые с точки зрения научных исследований результаты.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Норильский никель. Таймыр. Об активе. – Текст электронный. – URL: <https://www.nornickel.ru/business/assets/taimyr> (дата обращения: 01.10.202021).
2. Исследование шахтной вентиляционной сети рудника «Октябрьский». Ресурсы, пределы, лимиты. Перспективы развития. Заключит. этап: отчет о НИР / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2020. – 637 с.
3. 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; опубл. 20.02.2015. – 1 с.
4. 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).
5. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ...д.т.н.; 25.00.20: защищена 23.05.19 / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2019. – 247 с.
6. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х т. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – Т. 1. – 430 с.
7. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х томах. – Киев: Изд-во АН УССР, 1960. – Т. 2. – 347 с.
8. Зайцев А.В., Семин М.А., Паршаков О.С. Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года // Записки Горного института. – 2021. – Т. 250, № 4. – С. 562-568. – DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9.
9. De Souza E. The mystery of the ventilation raises // Proceedings of the 16<sup>th</sup> North American Mine Ventilation Symposium. – Colorado, 2017.–
10. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // Thermal Science and Engineering Progress. – 2020. – V. 20. – № статьи 100760. – DOI 10.1016/j.tsep.2020.100760.
11. Шалимов А.В., Казаков Б.П., Зайцев А.В. Аналитический подход к оценке эффекта водяной пробки в вентиляционных стволах шахт // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг ресурсов. – 2021. – Т. 332, № 6. – С. 39-48. – DOI: 10.18799/24131830/2021/06/3234.
12. Зайцев А.В., Бородавкин Д.А., Поляков И.В. Обеспечение безопасных условий труда по фактору микроклимата для условий глубокого калийного рудника // Горное эхо. – 2020. – № 1 (78). – С. 72-79. – DOI: 10.7242/echo.2020.1.16.
13. Поспелов Д.А., Зайцев А.В., Семин М.А., Мальцев С.В., Мизонов Е.Н. Повышение энергоэффективности системы вентиляции глубокого рудника за счет изменения аэродинамических параметров скипового ствола // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 9. – С. 135-144. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-9-0-135.