

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2020.1.16

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА ПО ФАКТОРУ МИКРОКЛИМАТА ДЛЯ УСЛОВИЙ ГЛУБОКОГО КАЛИЙНОГО РУДНИКА

А.В. Зайцев, Д.А. Бородавкин, И.В. Поляков  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе для условий глубокого калийного рудника представлены результаты исследований и разработки организационных и технических мероприятий по обеспечению безопасных условий труда по фактору микроклимата. Исследования включали анализ действующей нормативно-методической базы в области регламентирования микроклиматических условий, измерение уровня энергозатрат горнорабочих и определение индексов тепловой нагрузки среды в теплый и холодный период времени года. На основании выполненных исследований предложена система нормирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников. Выделены профессии, для условий которых требуется разработка и применение мероприятий по снижению тепловой нагрузки среды. На основании математического моделирования обосновано применение местного кондиционирования воздуха для улучшения микроклиматических условий. Приведено описание технологии кондиционирования и результаты натурных испытаний системы в подземном руднике для обеспечения безопасных условий труда в забоях проводимых горных выработок. По итогам работы сформулирован подход к обеспечению безопасных условий труда горнорабочих в условиях нагревающего микроклимата.

**Ключевые слова:** тепловой режим рудников, микроклимат, индекс тепловой нагрузки среды, уровень энергозатрат труда, кондиционирование воздуха, моделирование.

### Введение

На сегодняшний день горнодобывающая промышленность сталкивается с необходимостью вовлечения в отработку новых глубокозалегающих месторождений. С увеличением глубины возрастает температура горных пород, что приводит к ухудшению микроклиматических условий в горных выработках. С такой проблемой столкнулся подземный калийный рудник Гремячинского ГОК ООО «ЕвроХим-Волгакалий». На этом руднике глубина ведения горных работ превышает 1000 метров, измеренная температура массива горных пород составляет +33,5 °С. Проведение горных выработок предусматривается буровзрывным и комбайновыми способами. Работа ленточных конвейеров, проходческих комбайнов, погрузочно-доставочных машин и самоходных машин приводит к дополнительному разогреву воздуха в горных выработках рудника.

На начальной стадии работ выполнены экспериментальные исследования микроклиматических условий в горных выработках рудника в холодный и теплый периоды времени года, а также исследованы факторы формирования теплового режима рудника в целом. Установлен характерный для глубоких рудников характер формирования микроклиматических параметров в горных выработках различного типа. Так, воздух, поступающий по стволу в рудник, разогревается за счет гидростатического сжатия с градиентом 1 °С на 170 метра. Двигаясь по главным воздухоподающим выработкам воздух вследствие теплообмена с окружающим породным массивом принимает температуру горных пород и на расстоянии свыше 2000 метров температура воздуха равняется достигает +33 °С. При этом относительная влажность воздушной струи варьируется от 35 % в холодный период года до +55

% в теплый. Основной нагрев происходит в тупиковых горных выработках, в которых ведутся горные работы. Изначально воздух нагревается за счет разогрева от вентиляторов местного проветривания на величину от +3 °С до +5 °С и далее, в зависимости от мощности задействованного оборудования, происходит его дополнительный нагрев. Максимальные температуры воздуха в подземных рабочих зонах достигают +40 °С, создавая неблагоприятные микроклиматические условия, ухудшая пылевую обстановку и приводя к отключению электрооборудования вследствие перегрева.

Но в первую очередь при решении проблем регулирования теплового режима необходимо определить опасность условий труда для горнорабочих и обосновать систему нормирования микроклиматических условий.

### **Обоснование системы нормирования микроклиматических условий**

Существующие в Федеральных нормах и правилах «Правила безопасности при ведении горных работ ...» [1] требования к микроклиматическим параметрам воздуха не учитывают ряд важных особенностей. Во-первых, отсутствует учет комплексного влияния всех микроклиматических параметров воздуха – температуры, относительной влажности, скорости движения воздуха, излучения. Во-вторых, отсутствует учет времени пребывания персонала в выработках с различными микроклиматическими условиями и уровень энергозатрат при выполнении работ различной тяжести. Кроме того, пункт 155 «Правил безопасности при ведении горных работ ...» гласит, что «... при температуре воздуха свыше +26 °С должно предусматриваться его охлаждение или разрабатываться мероприятия, предусматривающие режим работы персонала с перерывами на отдых в специально оборудованных местах с температурой воздуха не выше +26 °С». Однако, данная формулировка не регламентирует ни время, ни условия для организации отдыха, а также не устанавливает предельные значения микроклиматических условий. В связи с этим остается открытым вопрос – на что следует ориентироваться при обосновании безопасных условий труда по тепловому фактору.

Более гибко микроклиматические условия нормируются в нефтяных шахтах [2] и угольных шахтах [3]. В частности, в нефтяных шахтах допускаются кратковременное выполнение работ (не более 1 часа и не больше 3-х раз в смену) при температуре до +36 градусов. В угольных шахтах для нормирования микроклиматических условий используется СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [4], применяющийся для производственных помещений на поверхности, который отражает наиболее полную систему нормирования микроклиматических условий, особенно в части оптимальных и допустимых параметров микроклимата. В тоже время, в пункте 6.10 документа есть замечание, что если допустимые условия микроклимата не могут быть обеспечены, то условия микроклимата следует рассматривать как вредные и опасные и разрабатывать мероприятия по профилактике неблагоприятного воздействия микроклимата (местное кондиционирование, организация отдыха), а в пункте 6.11 рекомендуется для сочетанного воздействия параметров микроклимата использовать интегральный показатель – индекс тепловой нагрузки среды (ТНС-индекс). Наряду с этим документом использование ТНС-индекса регламентируется СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах». ТНС-индекс характеризует комплексное воздействие от температуры, относительной влажности, скорости движения воздуха и интенсивности излучения [5].

Однако в обоих документах приведены только оптимальные и допустимые параметры микроклимата. В тоже время, при невозможности обеспечения допустимых параметров микроклиматических условий следует рассматривать предельно допустимые значения ТНС-индекса с учетом класса вредности условий труда. В связи с этим для обоснования микроклиматических условий в горных выработках и при разработке организационных и технических мероприятий следует руководствоваться требованиями к микроклиматическим параметрам, определенными «Методикой проведения специальной оценки условий труда» [6], определяющей степень вредности или опасности условий труда по фактору микроклимата в зависимости от ТНС-индекса с учетом тяжести выполняемых работ. Важным моментом является то, что класс условий труда определяется по средневзвешенному значению ТНС-индекса с учетом мест и продолжительности пребывания горнорабочих, ТНС-индекс является интегральным показателем и учитывает температуру, относительную влажность воздуха, скорость его движения и уровень излучения. Кроме того, предельные значения ТНС-индекса и класс условий труда устанавливаются с учетом уровня энергозатрат при выполнении работ различных подземных профессий.

Поскольку предельные значения ТНС-индекса зависят от уровня энергозатрат, для условий подземного рудника Гремячинского ГОК для всех подземных профессий определены уровни энергозатрат и тяжесть выполняемых работ. Определение производилось согласно ГОСТ Р ИСО 8996-2008 методом анализа на основе измерения частоты сердечных сокращений, микроклиматических условий, а также наблюдением за тяжестью и временем выполняемых работ, с последующей обработкой данных. В результате установлено, что 80 % подземных профессий относится к наиболее высокой, III категории работ по уровню энергозатрат (более 290 Вт).

На основании определенного уровня энергозатрат с применением определялся класс условий труда на основе редакции Специальной оценки условий труда, содержащей изменения и дополнения в особенности проведения специальной оценки условий труда на рабочих местах работников, занятых на подземных работах, предложенной Министерством труда и социальной защиты Российской Федерации [6]. Класс условий труда в этом случае устанавливается по ТНС-индексу в соответствии с таблицей 1.

Таблица 1

Классы (подклассы) условий труда в зависимости от величины ТНС-индекса (°С)  
в условиях нагревающего микроклимата

Класс условий труда					
Допустимый	Вредный				Опасный
	3.1	3.2	3.3	3.4	
23,9	24,2	25,0	26,4	29,9	30,0 и более

В случае, если в течение рабочей смены работник находится на рабочих местах, характеризующихся различным уровнем термического воздействия, класс условий труда определяется как средневзвешенная величина с учетом продолжительности пребывания на каждом рабочем месте. Следует отметить, что аналогичные системы нормирования микроклимата и оценки условий труда используются и за рубежом [7].

Для условий подземного рудника Гремячинского ГОК на основании определенного уровня энергозатрат и рассчитанных ТНС-индексов получены классы условий труда для профессий подземных работников, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения средневзвешенного ТНС-индекса для профессий подземных рабочих

Профессия	ТНС-индекс	Класс условий труда
Взрывник 5 разряда	23,3	Вредный 3.2
Горнорабочий подземный 3 разряда	23,3	Вредный 3.2
Машинист буровой установки 5 разряда	26,1	Вредный 3.4
Машинист горных выемочных машин 5 разряда	25,8	Вредный 3.3
Машинист подземной самоходной машины 4 разряда	25,8	Вредный 3.3
Проходчик 4 разряда	23,3	Вредный 3.2
Проходчик 5 разряда	26,5	Вредный 3.4
Слесарь по обслуживанию и ремонту оборудования 3 разряда	25,0	Вредный 3.3
Слесарь по обслуживанию и ремонту оборудования 4 разряда	24,4	Вредный 3.3
Стволовой 3 разряда	22,1	Вредный 3.2
Электрогазосварщик 3 разряда	23,4	Вредный 3.2
Электрогазосварщик 5 разряда	23,6	Вредный 3.3
Электрослесарь подземный 3 разряда	-	-
Электрослесарь подземный 4 разряда	24,5	Вредный 3.3
Электрослесарь подземный 5 разряда	24,2	Вредный 3.3

Результаты приведены для теплого периода времени года. По результатам оценки все профессии по своим условиям относятся к вредному классу условий труда и требуют разработки мероприятий по предотвращению возникновения опасных условий труда. В тоже время для большинства подземных профессий фактические условия труда по тепловому фактору являются вредными, но не опасными. Это связано с двумя основными факторами:

- периодичностью выполняемых рабочих операций и наличием времени отдыха в местах с пониженными значениями температуры по сравнению с пиковыми в тупиковых горных выработках;
- низкой относительной влажностью воздуха, определяющей низкое значение температуры воздуха по влажному термометру — основного определяющего фактора ТНС-индекса.

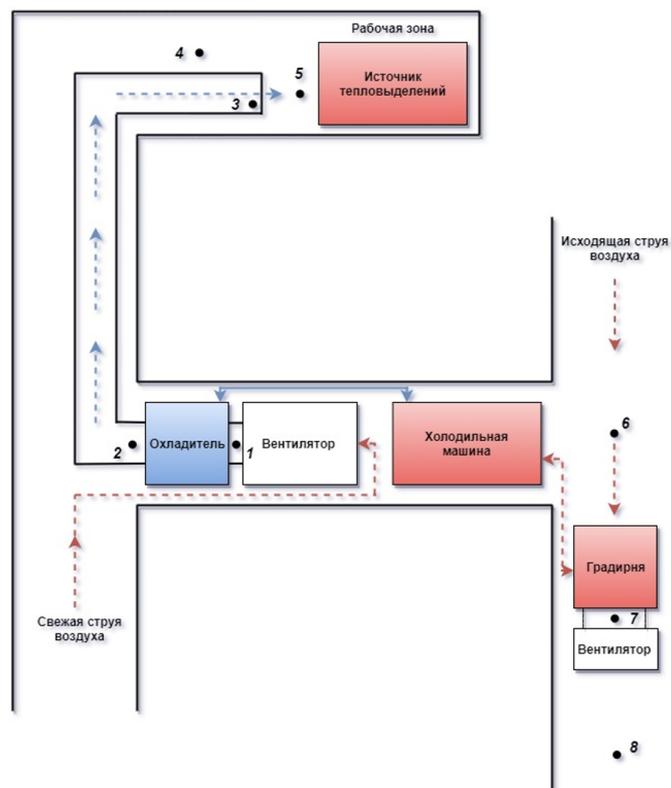
Однако в группу риска входят две профессии, для которых требуется разработка мероприятий по снижению средневзвешенного ТНС-индекса — профессии машиниста буровой установки и проходчика, так как это профессии характеризуются максимальным временем нахождения в призабойной части выработки, где наблюдаются максимальные температуры. Поэтому для этих профессий горнорабочих и соответствующих технологических процессов потребовалась разработать мероприятия по улучшению микроклиматических условий.

### Разработка технических решений по управлению тепловым режимом

На начальном этапе разработки технических решений в соответствии с принятым подходом [8] в аналитическом комплексе «АэроСеть» создана вентиляционная и тепловая модель подземного рудника Гремячинского ГОК. На модели выполнены расчеты эффективности снижения температуры за счет применения горнотехнических способов регулирования теплового режима (увеличение подачи воздуха, возможности изменения схемы проветривания, теплоизоляция стенок горных выработок) и установлено, что применительно к тупиковым горным выработкам, удаленным от околоствольного двора на расстояние более 2500 метров они

являются не эффективными. В связи с этим были рассмотрены теплотехнические способы регулирования теплового режима — системы местного и центрального охлаждения воздуха. В результате обоснована эффективность местного кондиционирования воздуха отдельных рабочих зон, а для реализации кондиционирования и отведения избыточных тепловыделений с учетом горнотехнических особенностей подземного рудника принят вариант подземных местных систем кондиционирования воздуха с отведением избыточной теплоты в исходящую вентиляционную струю. Схематично обоснованная технология кондиционирования приведена на рисунке 1. Суть заключается в размещении в подземных горных выработках трех основных элементов: воздухоохладителя, холодильной машины и градирни. Воздухоохладитель представляет собой рекуперативный теплообменник поверхностного типа, в котором происходит охлаждение воздушного потока хладоносителем. Воздухоохладитель обеспечивается хладоносителем за счет работы холодильной машины, которая охлаждает хладоноситель и избыточную теплоту передает теплоносителю. Охлаждение теплоносителя происходит в градирне, размещаемой на исходящей струе воздуха. Градирня также представляет собой рекуперативный теплообменник поверхностного типа, в котором происходит охлаждение теплоносителя исходящей струей воздуха, которая при этом нагревается. С помощью тепловой модели рудника определены необходимые технические параметры системы кондиционирования воздуха: холодильная мощность 180 кВт, расход охлаждаемого воздуха от 7 м<sup>3</sup>/с до 10 м<sup>3</sup>/с, требуемое расстояние подачи охлажденного воздуха с помощью вентиляционных ставов до 450 метров. Аналогичные системы кондиционирования воздуха уже находили свое применение на рудниках нашей страны, ближнего и дальнего зарубежья [9,10].

Описанная технология кондиционирования воздуха разработана и реализована совместно с компанией ООО «НПО «АэроСфера». На рисунке 2 изображен установленный в горных выработках воздухоохладитель системы с вентилятором и воздуховодом для подачи охлажденного воздуха в призабойную часть горной выработки.



**Рис. 1.** Схематичное изображение местной системы кондиционирования воздуха, разработанной для рудника ООО «ЕвроХим-Волгакалий», цифрами обозначены точки измерения микроклиматических параметров



**Рис. 2.** Установленный воздухоохладитель в горных выработках рудника

В ходе испытаний системы кондиционирования воздуха установлен значительный нагрев охлажденного воздуха при его подаче традиционными гибкими воздуховодами. Поэтому для увеличения эффективности снижения температуры воздуха в призабойном пространстве в результате использован теплоизолированный гибкий воздуховод. Результаты испытаний представлены в таблице 3, точки соответствуют местам измерений, схематично изображенным на рисунке 1.

**Таблица 3**

Параметры теплового режима выработок до и с применением системы кондиционирования воздуха

	Параметр	Точка							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Без СКВ	Температура, °С	—	—	35	32	36,1	34,3	—	34,4
	Относительная влажность, %	—	—	32	36,2	36,4	26,5	—	27,1
С СКВ	Температура, °С	26,3	12,2	21,7	26,4	26,0	32,6	57,8	37,2
	Относительная влажность, %	28	66	33	36,9	37,0	23,6	8,8	18,8

По результатам выполненных натурных испытаний и экспериментальных исследований можно утверждать, что разработанная СКВ обеспечила требуемую холодильную мощность 180 кВт при охлаждении подаваемого воздушного потока с +26,3 °С до +12,2 °С и снижении температуры воздуха в устье охлаждаемой выработки с +36,1 °С до +26,0 °С. Эффективность зоны охлаждения в выработке составляет 25 метров от конца воздуховода системы кондиционирования воздуха.

Несмотря на полученные положительные результаты охлаждения воздуха в горных выработках, кондиционирование воздуха носит местный характер и обеспечивает ло-

кальную зону нормализации микроклиматических условий. Поэтому в рассматриваемых неблагоприятных микроклиматических условиях важным аспектом является контроль среднесменного ТНС-индекса у подземных горнорабочих, и в случае невозможности его снижения за счет кондиционирования альтернативным вариантом является привлечение дополнительного персонала для сокращения времени работы в условиях высоких температур воздуха.

### Заключение

Выполненные комплексные научные исследования по обеспечению безопасных условий труда по фактору микроклимата для условий глубокого калийного рудника включали измерение уровня энергозатрат подземных рабочих и средневзвешенного индекса тепловой нагрузки среды. В результате установлено, что для большинства подземных профессий условия труда является вредными, но не опасными по тепловому фактору.

Наиболее неблагоприятные микроклиматические условия наблюдаются при работе горных машин в призабойном пространстве тупиковых горных выработок, удаленных от околоствольных дворов. Для этих рабочих зон обеспечение безопасных условий труда достигается местным кондиционированием воздуха, технология которого разработана и апробирована в натуральных условиях. Альтернативным вариантом может быть увеличение персонала, задействованного для выполнения работ в тяжелых условиях, что позволит снизить среднесменное значение ТНС-индекса.

Обязательным мероприятием обеспечения безопасных условий труда является контроль микроклиматических условий в горных выработках и значений среднесменного ТНС-индекса для каждой подземной профессии.

*Работа выполнена в рамках Программы ФНИ, проект № 0422-2019-0145-С-01 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2).*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых». Вып. 78: утв. 11.12.2013, № 32935. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – 276 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03). (с изменениями на 21 ноября 2018 г. в ред., действующей с 17 марта 2019 г.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности при разработке нефтяных месторождений шахтным способом»: утв. 28.11.2016, № 501. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420385052> (Дата обращения: 15.03.2020).
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Вып. 40: утв. 19.11.2013, № 30961. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 196 с. – (Документы по безопасности, надзорной и разрешительной деятельности в горнорудной промышленности: сер. 05).
4. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений. – М., 1997. – 12 с.
5. СанПиН 2.2.4.3359-16. Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах: Утв. 21.06.2016, № 81. – Текст электронный // Консорциум КОДЕКС. Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации: офиц. сайт. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/420362948>. (Дата обращения: 15.03.2020).
6. Методика проведения специальной оценки условий труда: Утв. 24.01.2014, № 33н. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2014. – 64 с.
7. Zhao-gui Su, Zhong-an Jiang, Zhong-qiang. Sun Study on the heat hazard of deep exploitation in high-temperature mines and its evaluation index // Procedia Earth and Planetary Science. – 2009. – V. 1, № 1. – P. 414-419.
8. 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.

9. Han Qiaoyun, Zhang Yi, Li Kongqing, Zou Shenghua. Computational evaluation of cooling system under deep hot and humid coal mine in China: A thermal comfort study // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2019. – V. 90. – P. 394-403.
10. Левин, Л.Ю., Зайцев А.В., Бутаков С.В., Семин М.А. Нормализация микроклиматических условий горных выработок при отработке глубокозалегающих запасов калийных рудников // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 97-102.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2020.1.17

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА В НАКЛОННОЙ ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

Е.В. Колесов, Б.П. Казаков  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** приведены результаты численного трехмерного моделирования аэродинамических процессов в наклонной тупиковой горной выработке, проветриваемой за счет общешахтной депрессии. Осуществляется выбор и обоснование алгоритма численного трехмерного моделирования динамики двухфазной смеси «воздух-сернистый газ» с использованием CFD-методов. На базе построенной модели производится оценка глубины проветривания тупиковой выработки за счет турбулентной диффузии, а также возможность стратификации газовой смеси по высоте выработки и дальнейшего «стекания» тяжелой газовой фракции  $SO_2$  (сернистого газа).

**Ключевые слова:** вентиляция горных выработок, трехмерное численное моделирование, турбулентность, стратификация газовой смеси.

### Введение

Согласно существующим правилам безопасности действующие выработки должны проветриваться активной струей воздуха за счет общешахтной депрессии, либо с помощью вентиляторов местного проветривания, если речь идет о тупиковых выработках [1-2]. Недействующие вертикальные и наклонные выработки должны иметь надежное перекрытие, а доступ людей в непроветриваемые выработки должен быть закрыт. В непроветриваемых активной струей воздуха тупиковых выработках возможно не только превышение концентрации ядовитых газов выше ПДК, но и уменьшение содержания кислорода в воздухе [3-5]. Экспериментальные измерения в недействующей наклонной тупиковой выработке рудника Таймырский ПАО «ГМК «Норильский никель» выявили уменьшение содержания кислорода с 20,9% вблизи устья до 2,6 % вблизи забоя (при этом кислород был пропорционально замещен азотом и другими газами, входящими в состав воздуха). Одной из гипотез уменьшения содержания кислорода в тупиковой выработке была следующая последовательность событий. В ходе химической реакции окисления сульфидной руды кислород в воздухе тупиковой выработки заместился более тяжелым, чем воздух, сернистым газом  $SO_2$  (плотность 2,77 кг/м<sup>3</sup>). После этого сернистый газ отслоился ближе к почве тупиковой выработки, под действием силы тяжести опустился к устью, и далее был вынесен воздушной струей, идущей по сквозной выработке. Для проверки или опровержения этой гипотезы был применен аппарат вычислительной аэродинамики.

### Содержательная постановка задачи

Исследуемая область представляет собой тупиковую непроветриваемую выработку с поворотом и часть сквозной проветриваемой выработки в области их сопряжения. Тупиковая выработка имеет вертикальный подъем под углом 16° длиной около 70 метров. В ходе обследования тупиковой выработки специалистами были выполнены отборы