

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.4

ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ВЕНТИЛЯЦИОННОМ СТВОЛЕ ГЛУБОКОГО РУДНИКА ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ В ХОЛОДНОЕ ВРЕМЯ ГОДА

М. А. Семин, Н. А. Князев, Д. С. Кормщиков

*Горный институт УрО РАН,
E-mail: seminma@inbox.ru, ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Рассмотрен реверсивный режим проветривания рудника в зимнее время года во время аварии. В результате подачи холодного воздуха в горные выработки возникает угроза здоровью людей при эвакуации, а технологическое оборудование испытывает негативное воздействие воздуха с отрицательными температурами. Для разработки компенсирующих мероприятий исходными данными является возможное нестационарное распределение температуры воздуха в горных выработках после реверсирования. Описана методика расчета распределения температуры воздуха в вентиляционном стволе при реверсировании воздушной струи, основанная на математическом моделировании нестационарных тепловых процессов в стволе и окружающих породах. Корректный выбор коэффициента теплоотдачи между воздухом и крепью ствола определен путем сравнения результатов математического моделирования с данными экспериментальных исследований динамики температуры воздуха при плановом реверсировании воздушной струи.

Рудничная вентиляция, реверсивный режим проветривания, вентиляционный ствол, коэффициент теплоотдачи, моделирование, тепловые процессы, экспериментальные исследования

DOI: 10.15372/FTPRPI20230111

В настоящее время наиболее распространенный вид аварий на горнодобывающих предприятиях — подземные пожары. Согласно статистическим сведениям, данный вид аварии составляет около 66 % от общего числа аварийных ситуаций, приводящих к нарушению режима работы предприятия, серьезному материальному ущербу, а также угрозе здоровью и жизни людей [1, 2]. Для определения мер и действий, необходимых для спасения людей и ликвидации последствий аварий в шахтах и рудниках, нужна разработка плана ликвидации аварий,

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования (рег. номер проекта 121111800053-1).

охватывающего все действующие горные выработки. При этом рудник разбивается на группы выработок (позиции) с одинаковым режимом проветривания и маршрутами выхода людей [3]. Для каждой позиции разрабатывается ряд мероприятий, одно из которых — установление аварийного режима проветривания. Данный режим направлен на обеспечение безопасного выхода людей, застигнутых аварией в подземных условиях, и ее успешной ликвидации.

В зависимости от места возникновения пожара предусматриваются различные аварийные вентиляционные режимы: нормальный, существовавший до аварии и реверсивный, связанный с изменением направления движения воздушной струи.

В случае возникновения пожара в надшахтных зданиях, стволах, околоствольных дворах, а также главных квершлагах (штреках), по которым осуществляется подача свежего воздуха в рудник, обычно предусматривается реверсирование вентиляционной струи [4]. Подобная аварийная ситуация в холодное время года может привести к подаче в рудник воздуха с отрицательной температурой, так как вентиляционные стволы, как правило, не оборудуются калориферными установками. В свою очередь, п. 151 Федеральных норм и правил “Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых” устанавливает, что воздух, поступающий в подземные горные выработки, должен иметь температуру не ниже $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, за исключением рудников, расположенных в зонах многолетней мерзлоты, где температура воздуха определяется проектом.

Вопрос подачи холодного воздуха при реверсировании вентиляционной струи имеет особую актуальность для шахт и рудников, расположенных в арктическом и субарктическом климатических поясах, где среднегодовая температура воздуха достигает $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$, а продолжительность периода со среднесуточной температурой воздуха ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ — 250 дней в году. Влияние подачи холодного воздуха в рудник по вентиляционным стволам описан в [5–8]. Основные последствия связаны с нарушением работы крепи вентиляционных стволов и технологического оборудования, расположенного непосредственно в стволах и их околоствольных дворах, а также с влиянием на самочувствие и здоровье людей при эвакуации.

Для снижения негативного воздействия холодного воздуха во время реверсирования необходима разработка компенсирующих технических и организационных мероприятий. Комплекс мероприятий, позволяющих повысить безопасность проведения эвакуации и сохранить работоспособность крепи и оборудования вентиляционных стволов, требует отдельного рассмотрения. Основой для разработки данных мероприятий является прогноз температурного режима вентиляционной струи, поступающей в рудник при различных периодах реверсирования.

Анализ литературных источников [9–13] позволяет заключить, что температурный режим воздушной струи при реверсировании зависит от следующих факторов:

- климатический регион, в котором находится горнодобывающее предприятие;
- процессы теплообмена между рудничным воздухом и породным массивом, определяемые геотермией участка и глубиной ведения горных работ;
- количество подаваемого воздуха при реверсе;
- гидростатическое сжатие/расширение воздуха при его движении по вертикальным или наклонным горным выработкам;
- технические параметры вентиляционных стволов, а также их обводненность;
- количество и мощность источников тепловыделений, участвующих в теплообмене с воздухом по ходу его подачи в рудник.

Вклад тех или иных факторов при прогнозе температурного режима должен рассматриваться индивидуально для каждого горного предприятия. При этом существует возможность получения экспериментальных данных о динамике температур для конкретного предприятия во время проведения планового реверса, выпадающего на холодный период года. Однако действующие климатические условия во время выполнения планового реверса и его длительность могут значительно отличаться от возможных (наиболее сложных) временных и климатических условий при возникновении реальной аварийной ситуации. На практике длительность планового реверса ограничивается 1.5–2.0 ч, а температура атмосферного воздуха существенно превышает возможные минимумы для рассматриваемого региона, что не позволяет оценить наиболее сложный температурный режим вентиляционной струи, основываясь только на экспериментальных замерах.

Цель настоящей работы — разработка методики прогнозирования температурного режима вентиляционной струи, поступающей в рудник при реверсировании в холодное время года, основанной на математическом моделировании теплопереноса в вентиляционном стволе, крепи ствола и окружающих породах. Особенность модели — ее параметризация и валидация по экспериментальным данным, полученным при плановом реверсе на действующем горнодобывающем предприятии. Данная методика позволяет получить распределение температур воздушной струи при реверсировании для наиболее тяжелых условий, когда температура атмосферного воздуха имеет наименьшее значение для рассматриваемого региона, а период прогноза превышает длительность планового реверса.

Исследование теплообменных процессов при реверсировании воздушной струи проводилось в следующем порядке:

- экспериментальные измерения микроклиматических параметров воздуха в динамическом режиме при проведении планового реверса на различных участках вентиляционного ствола;
- создание расчетной математической модели теплообменных процессов в вентиляционном стволе при реверсе и определение эффективного коэффициента теплоотдачи стенок ствола путем минимизации рассогласования модельных данных с результатами экспериментальных измерений;
- анализ теплопереноса в рудничной вентиляционной сети при реверсе с использованием откалиброванной математической модели теплообмена в вентиляционном стволе, валидация модели по результатам дополнительных экспериментальных данных;
- прогноз температурного режима вентиляционной струи при реверсировании для наиболее сложных климатических и временных условий.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВОЗДУХА В ВЕНТИЛЯЦИОННОМ СТВОЛЕ

Исходные данные для расчета теплообменных процессов в вентиляционном стволе — результаты экспериментальных исследований изменения температуры входящей вентиляционной струи при реверсировании. В качестве примера рассматриваются данные, полученные в ходе проведения планового реверса в холодный период года на одном из рудников, расположенном в северной части Красноярского края за полярным кругом.

Для получения комплексной картины аэродинамических и теплофизических процессов в вентиляционном стволе при реверсировании аэротермодинамические параметры воздуха измерялись в нескольких точках вентиляционного ствола. Замерные точки выбирались на сопряжениях ствола с вентиляционным каналом и каждым подземным горизонтом, а также с дневной поверхностью. На рис. 1 представлена схема вентиляционного ствола с расположением экспериментальных замерных станций. Замеры в точках *A*, *B*, *C*, *D*, *E* проводились с частотой один раз в 2–3 мин на протяжении всего планового реверса, начиная с момента остановки главного вентилятора для смены режима проветривания. Температура и влажность воздуха в точках *A* и *B* измерялись с помощью портативных метеорегистраторов Kestrel DROP D3. Замер скорости воздуха в точке *B* выполнен по стационарному датчику, установленному в вентиляционном канале главной вентиляторной установки, а замер площади поперечного сечения — с помощью лазерной рулетки Leica Disto D2. Замеры в точках *C*, *D* и *E* осуществлялись с использованием термовлагомера Fluke 971, лазерной рулетки Leica Disto D2, а также анемометра АПР-2. Перед началом реверса в точках *B*, *C*, *D* и *E* зафиксированы начальные (установившиеся) микроклиматические параметры воздуха в нормальном режиме проветривания и начальное поле температур поверхности ствола при помощи инфракрасного термометра Fluke 561.

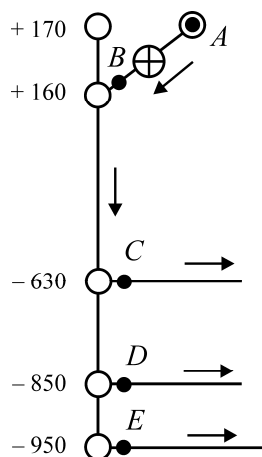


Рис. 1. Положение экспериментальных замерных станций при исследованиях микроклиматических параметров воздушной струи при реверсировании: *A* — замер температуры, влажности и давления атмосферного воздуха; *B* — замер температуры, влажности и скорости воздуха на сопряжении вентиляционного канала и ствола; *C*, *D*, *E* — замер температуры, влажности и скорости воздуха на сопряжениях вентиляционного ствола с главными вентиляционными штреками; цифрами обозначены геодезические высотные отметки

Продолжительность реверса по установленному предприятием плану составила 30 мин с учетом перевода главного вентилятора в реверсивный режим проветривания. По данным экспериментальных исследований, на смену режима проветривания затрачено 6 мин, остальные 24 мин наблюдалось устойчивое проветривание в реверсивном режиме. Расход воздуха в точках *B*, *C*, *D*, *E* определен по результатам замеров скорости движения воздуха и площади поперечных сечений.

При вычислении расхода воздуха в стволе получено, что при нормальном режиме проветривания он равен 398.5 м³/с, а при реверсировании — 234.4 м³/с, или 59 % от нормального; выход на установившийся реверсивный режим проветривания составил приблизительно 10 мин после запуска главного вентилятора.

Относительная влажность воздуха на сопряжении вентиляционного канала и ствола вне зависимости от режима проветривания равна 100 %. Это связано с конденсацией и аккумулярованием влаги при охлаждении исходящей воздушной струи в нормальном режиме проветривания. Относительная влажность воздуха на сопряжениях со стволом в нормальном режиме проветривания колебалась в диапазоне 55 – 76 % и увеличилась до 85 % к концу планового реверса. Температура атмосферного воздуха во время проведения реверса составила -27°C при относительной влажности 15 %. На рис. 2 показано изменение температуры вентиляционной струи в ходе замеров; значения температур воздуха на оси ординат для кривых *B*, *C*, *D* и *E* соответствуют нормальному режиму проветривания.

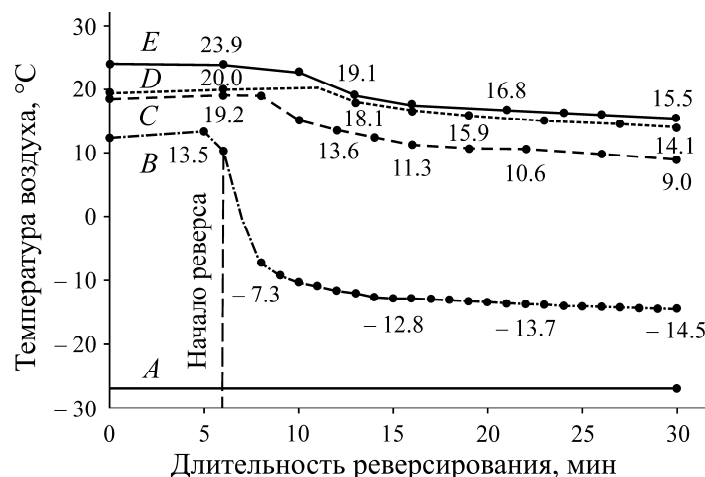


Рис. 2. Изменение температуры вентиляционной струи при плановом реверсе

Данные экспериментальных исследований позволяют определить временную динамику температуры в ключевых замерных точках вентиляционного ствола. Временные зависимости температуры указывают на существенную нестационарность процессов теплопереноса, что связано с двумя факторами:

- нестационарностью воздухораспределения в период перехода с нормального на реверсивный режим проветривания;
- нестационарным теплообменом воздушного потока с крепью ствола в реверсивном режиме проветривания.

Первый фактор влияет преимущественно в течение 10-минутного промежутка времени с момента начала реверсирования, в то время как второй фактор значим на всем временном интервале реверсирования и определяется прежде всего коэффициентом теплоотдачи между воздушным потоком и крепью ствола. Исходя из полученных временных зависимостей температуры и их сопоставления с расчетными зависимостями на математической модели теплопереноса в воздушном пространстве ствола, его крепи и породном массиве, можно вычислить фактический коэффициент теплоотдачи вентиляционного ствола.

Традиционно при расчете воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях в нормальном режиме проветривания фактором теплообмена воздуха с крепью стволов обычно пренебрегают, считая этот процесс квазистационарным. Теплоотдачу между воздухом и породным массивом в горных выработках подземных горизонтов рассчитывают на основании коэффициента теплоотдачи [9]. В реверсивном режиме проветривания нельзя пренебрегать фактором теплоотдачи в вентиляционном стволе [14], а использование формулы Щербаня [9] с коэффициен-

тами, используемыми для обычных горных выработок, скорее всего, окажется некорректным ввиду геометрических особенностей крепи и армировки стволов, влажности стенок крепи ствола, водоприток в ствол. С данной особенностью столкнулись авторы в [15]. В [9, 16] отмечается, что коэффициент теплоотдачи для влажных вентиляционных стволов значительно отличается в большую сторону от значений, полученных для необводненных горных выработок.

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВЕНТИЛЯЦИОННОМ СТВОЛЕ ПРИ ПЛАНОВОМ РЕВЕРСЕ

Рассматривается наиболее протяженный участок ствола (790 м) между точками В и С. В начальный момент времени, соответствующий переключению с нормального на реверсивный режим проветривания, поле температур в стволе считается установившимся и распределенным по высоте по линейному закону:

$$T_0(x) = 12.4 + 0.00785x, \quad (1)$$

где x — вертикальная координата, отсчитываемая от отм. + 160 м вниз по стволу.

Относительная влажность воздуха в стволе в начальный момент времени распределена по стволу в соответствии с линейным законом:

$$\varphi(x) = 100 - 0.03x. \quad (2)$$

Линейные законы (1) и (2) получены путем аппроксимации данных натурных измерений на верхней и нижней границах участка ствола. Предварительный теоретический анализ функциональных зависимостей относительной влажности и температуры воздуха от вертикальной координаты вдоль оси вентиляционного ствола в нормальном режиме проветривания показал, что использование линейного закона уместно, поскольку ключевой фактор изменения этих параметров в начальный момент времени — гидростатическое расширение воздуха.

Во время реверса температура воздуха на верхней и нижней границах участка ствола является переменной величиной и определяется в соответствии с данными натурных измерений, как показано на рис. 2. Предполагается, что при реверсировании воздушной струи холодный воздух, движущийся по стволу, изменяет свои термодинамические свойства ввиду действия следующих физических факторов: гидростатическое сжатие/разогрев; нестационарный теплообмен со стенками ствола.

Считается, что влагосодержание воздуха остается неизменным. Конденсации влаги на стенках ствола в данном случае не происходит из-за низкой относительной влажности поступающего в ствол холодного воздуха, последующего нагревания воздуха при его опускании по стволу. Приток влаги к воздуху от влажных стенок ствола мал, на что указывает экспериментально отмеченный факт уменьшения относительной влажности воздуха при его постепенном опускании вниз по стволу и нагреве в реверсивном режиме проветривания. Тем не менее водяная пленка на стенках ствола оказывает тепловое воздействие на воздушный поток вследствие как увеличения коэффициента теплоотдачи от стенки ствола, так и дополнительных теплопритоков при замерзании влаги. Данное тепловое воздействие будет учитываться в рамках второго, отмеченного выше, фактора.

Протекание упомянутых физических процессов описывается дифференциальным уравнением конвективного переноса теплоты в воздушном пространстве ствола [14]:

$$\rho_a C_v \frac{dT}{dx} - \frac{P}{\rho_a} \frac{d\rho_a}{dx} = \frac{4\alpha}{DV} (T_m(t) - T), \quad (3)$$

здесь ρ_a — плотность воздуха, кг/м^3 ; C_v — удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; P — давление, Па; α — коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot^\circ\text{C})$; D — диаметр ствола, м; V — средняя скорость воздуха в стволе, м/с; $T_m(t)$ — температура крепи ствола на границе с воздухом, $^\circ\text{C}$; x — координата вдоль оси ствола, отсчитываемая от сопряжения с вентиляционным каналом вниз по стволу, м.

Уравнение (3) дополняется граничным условием по температуре на входе:

$$T(0) = T_{in}(t) \quad (4)$$

и уравнениями состояния влажного воздуха

$$\rho_a = \frac{29P - 0.11\varphi[479 + (11.52 + 2.62T)^2]}{8314(T + 273)}, \quad (5)$$

$$\varphi = \frac{Pm}{611 \exp\left(\frac{17.5T}{T + 241.5}\right)(0.622 + m)}, \quad (6)$$

$$P = 99170 + \rho_a g(x + H), \quad (7)$$

где $T_{in}(t)$ — температура воздуха в точке B , $^\circ\text{C}$; m — влагосодержание на входе в вентиляционный ствол, кг/кг ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 ; H — глубина точки B по отношению к дневной поверхности, м.

В момент времени, соответствующий началу реверса, температура поверхности ствола принимается распределенной по высоте и равной температуре воздуха в нормальном режиме проветривания. Изменение температуры крепи ствола и породного массива при реверсе описывается дифференциальным уравнением кондуктивного переноса теплоты в частных производных [17]:

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

и граничными условиями

$$\left[\frac{\partial T_m}{\partial r} - \frac{\alpha}{\lambda} (T - T_m) \right]_{r=D/2} = 0, \quad (9)$$

$$T_m|_{r=R_{out}} = T_0(x), \quad (10)$$

здесь a — коэффициент температуропроводности системы “крепь – порода”, $\text{м}^2/\text{с}$; λ — коэффициент теплопроводности крепи, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$; r — радиальная координата, м; R_{out} — радиус внешней границы расчетной области, м; $T_0(x)$ — распределение температуры породного массива с глубиной (предполагается равным распределению (1) температуры воздуха в нормальном режиме проветривания), $^\circ\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи между воздухом и поверхностью выработок определяется как [16]

$$\alpha = 3.4K \frac{V^{0.8}}{D^{0.2}}, \quad (11)$$

K — коэффициент модели, полученный в ходе сопоставления с данными эксперимента.

Коэффициент K для горных выработок принимается равным единице [17–19], но в случае обводненных вентиляционных стволов может быть в несколько раз выше [15]. В результате решения системы уравнений (1)–(11) можно определить динамику температуры воздуха в точке, соответствующей точке C , и сравнить ее с экспериментальной кривой, представленной на рис. 3. В модели (1)–(11) коэффициент K подбирается так, чтобы теоретическая и экспериментальная временные зависимости температуры на отм. –630 м были как можно ближе друг к другу. Количественной мерой близости теоретической и экспериментальной кривой может служить невязка:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [T_e(t_i) - T_m(t_i)]^2}{n}}, \quad (12)$$

где $T_e(t_i)$ — экспериментально измеренная температура в момент времени t_i ; $T_m(t_i)$ — теоретически вычисленная (модельная) температура в момент времени t_i ; n — количество замеров.

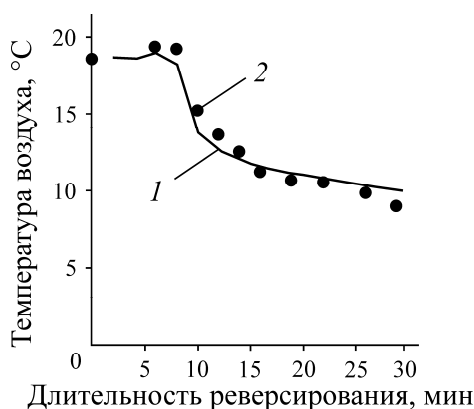


Рис. 3. Сравнительный анализ теоретической (1) и экспериментальной (2) кривых температуры воздуха на отм. –630 м

В результате минимизации невязки (12) для рассматриваемого случая получено, что $K = 4.8$, т. е. коэффициент теплоотдачи стенки ствола в 4.8 раза выше, чем по классической формуле. Теоретическая и экспериментальная кривые температуры воздуха при реверсировании имеют некоторые локальные расхождения (рис. 3). Отклонение экспериментальной и теоретической кривых можно объяснить нестационарными процессами, происходящими в вентиляционной сети рудника при реверсировании, а также замерзанием влаги, находящейся в стволе, поскольку учесть эти особенности с точки зрения модели нестационарного теплообмена в горной выработке невозможно.

КАЛИБРОВКА ТЕПЛОВОЙ МОДЕЛИ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО СТВОЛА

Определение поправочного коэффициента K модели теплообменных процессов выполнено для одного из участков вентиляционного ствола. На следующем этапе проведена проверка корректности поправочного коэффициента K при расчете коэффициента теплоотдачи по формуле (11) для нижележащих участков вентиляционного ствола. Проверка выполнена на вентиляционной сети рассматриваемого рудника, разработанной в модуле теплогазодинамического расчета программы “АэроСеть” [20–22]. Тепловая модель позволила рассчитать распределения расходов и температур воздуха во всех выработках вентиляционной сети рудника при реверсе. Далее сравнивались расчетные и фактические температуры воздуха на других участках вентиляционного ствола, где проводились натурные замеры (точки D и E).

В табл. 1 представлены результаты моделирования, а также сравнительный анализ фактического и расчетного распределения температур воздуха в стволе с учетом поправочного коэффициента K по окончании планового реверсирования вентиляционной струи в холодное время года.

ТАБЛИЦА 1. Сравнительный анализ фактических и расчетных температур воздуха

Участок	Температура, °C		Отклонение, %
	фактическая	модельная	
Атмосфера	– 27.0	– 27.0	—
Вентиляционный канал	– 14.5	– 14.4	0.7
Горизонт – 630 м	9.0	9.4	4.4
Горизонт – 850 м	14.1	14.6	3.5
Горизонт – 950 м	15.5	16.2	4.5

Отклонение между фактическими и модельными температурами воздуха в точках D и E не превышает 4.5 %. Следовательно, подобранный коэффициент теплоотдачи справедлив для всего вентиляционного ствола и может применяться для прогноза распределения температуры воздуха во время реверса при иных параметрах атмосферы. Стоит учитывать, что коэффициент K при расчете коэффициента теплоотдачи между воздухом и породным массивом для горных выработок подземных горизонтов принимается равным единице.

ПРОГНОЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СТРУИ

Важные факторы при моделировании реверсирования вентиляционной струи в холодное время года — температура атмосферного воздуха и длительность реверсирования. Температура воздуха определяется в зависимости от расположения горнодобывающего предприятия в соответствии с СП 131.13330.2018 “Свод правил. Строительная климатология”. За наиболее неблагоприятные условия в местности, где расположены рассматриваемые рудники, принимается температура холодной пятидневки, равная –47 °C. Время реверсирования ограничивается 24 ч. Данная температура принята в качестве входного значения для параметризованной ранее тепловой модели вентиляционного ствола. Выполнено моделирование теплообменных процессов в стволе при переходе на реверсивный режим проветривания в течение 24 ч. В табл. 2 приведены расчетные распределения температуры воздуха по глубине ствола для указанных климатических условий.

ТАБЛИЦА 2. Температура воздуха в стволе при реверсивном режиме проветривания, °C

Участок	Промежуток времени, ч			
	1	2	12	24
Вентиляционный канал	– 31.9	– 34.7	– 36.5	– 37.0
Горизонт – 630 м	– 0.6	– 8.9	– 16.5	– 20.1
Горизонт – 850 м	8.1	0.8	– 7.2	– 12.1
Горизонт – 950 м	10.5	3.7	– 4.0	– 8.8

Согласно полученным результатам, поле температур в вентиляционном стволе при реверсировании воздушной струи подвержено значительным изменениям в рассматриваемом промежутке времени. Спустя 8 ч после начала реверсирования температура воздуха становится отрицательной по всей глубине ствола, что существенным образом сказывается на:

- естественной тяге, приводя к еще большему увеличению количества воздуха, поступающего в рудник;
- сохранении работоспособности оборудования, расположенного в непосредственном контакте с холодным воздухом;
- выборе эффективных и безопасных мероприятий по эвакуации людей с подземных горизонтов на поверхность по этому стволу.

При моделировании режима проветривания и планировании мероприятий в реверсивных режимах проветривания рудников важными моментами являются построение корректной модели теплообменных процессов в горных выработках рудника с учетом переменности поля температур крепи ствола, окружающих пород, а также калибровка модели по данным экспериментальных исследований в шахтных стволах при плановом реверсировании воздуха в зимнее время года. Рассмотренный пример ствола медно-никелевого рудника показал, что справочные значения параметров тепловых моделей (коэффициент теплоотдачи) могут не соответствовать фактической ситуации из-за физико-технических факторов (особенностей армировки ствола, водопроявлений в нем и пр.). Важно понимать, что каждый шахтный ствол уникален с точки зрения выраженности тех или иных физических процессов, протекающих к нему. Поэтому необходимо продолжить настоящее исследование на предмет анализа особенностей теплопереноса при плановом реверсировании воздуха на других стволах.

ВЫВОДЫ

Приведены результаты исследования температурного режима вентиляционной струи при реверсе на примере одного из горнодобывающих предприятий. Описаны результаты экспериментальных исследований, параметризация и калибровка математической модели теплообменных процессов на участке ствола при реверсировании, с помощью которой выполнен прогноз распределения температуры воздуха в сетевой постановке с использованием программного комплекса “АэроСеть”.

В ходе расчета теплообменных процессов наиболее протяженного участка вентиляционного ствола определено, что коэффициент теплоотдачи стенок ствола при реверсе в 4.8 раза выше, чем аналогичные значения из справочников и научной литературы. Это связано с высокой обводненностью ствола, что не учитывается в ряде классических формул.

В результате прогноза температурного режима вентиляционной струи при наиболее сложных атмосферных условиях (-47°C) и длительности реверсирования 24 ч установлено, что спустя 8 ч после начала реверса температура воздуха становится отрицательной по всей глубине ствола и может достигать -37°C на сопряжении вентиляционного канала и ствола. Столь низкие температуры воздуха могут создать угрозу здоровью людей при эвакуации через запасные выходы.

Результаты прогноза использованы для формирования плана мероприятий на существующем горнодобывающем предприятии, позволяющего повысить безопасность эвакуации людей во время реверсирования в холодный период года. Данный подход в исследованиях реверсивного режима проветривания применим для действующих и проектируемых горных предприятий, позволяет точнее оценить и повысить безопасность их деятельности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Портола В. А., Овчинников А. Е., Жданов А. Н. Оценка мер по предупреждению эндогенных пожаров в угольных шахтах // ГИАБ. — 2019. — № 12. — С. 205–214.
2. Портола В. А., Овчинников А. Е., Син С. А., Игишев В. Г. Анализ аварийности и пожароопасности угольных шахт // Вестн. Научного центра по безопасности работ в угольной пром-сти. — 2018. — № 4. — С. 36–42.
3. Методические рекомендации о порядке составления планов ликвидации аварий при ведении работ в подземных условиях: утв. приказом Ростехнадзора № 364 от 24.05.2007 г. — С. 6–10.
4. Pach G., Róžański Z., Wrona P., Niewiadomski A. P., Zapletal P., and Zubíček V. Reversal ventilation as a method of fire hazard mitigation in the mines, *Energies*, 2020, Vol. 13. — P. 1–17.
5. Kurilko A. and Solovov D. Temperature conditions in the ventilation shaft lining and the space behind lining when reversing the main ventilation unit in winter, *Proc. of VIII int. scientific conf. Problems of Complex Development of Georesources — EDP Sciences*, 2020. — Vol. 192. — P. 1–7.
6. Левин Л. Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — 2010. — С. 24–32.
7. 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 пром-сти. — 2022. — № 1. — С. 14–19.
8. Зайцев А. В., Кузьминых Е. Г., Ольховский Д. В. Безопасность реверсирования воздушных потоков в шахтах и рудниках в холодное время года // Вестн. гос. экспертизы. — 2022. — № 1. — С. 66–73.
9. Щербань А. Н., Кремнев О. А. Научные основы расчета и регулирования теплового режима глубоких шахт. — Киев: АН УССР, 1959. — Т. 1. — 430 с.
10. Воропаев А. Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 247 с.
11. Гендлер С. Г. Тепловой режим подземных сооружений. — Л.: ЛГИ им. Г. В. Плеханова, 1987. — 102 с.
12. Медведев Б. И. Регулирование тепловых условий в лавах путем распределенной подачи охлажденного воздуха // Тр. семинара по горной теплотехнике. — Киев: АН УССР, 1959. — Вып. 2. — С. 79–84.
13. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Гришин Е. Л. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподающего ствола и породным массивом // ФТПРПИ. — 2011. — № 5. — С. 91–99.
14. Петров Н. Н., Тимошенко И. И. Тепловой режим вентиляционных стволов и его регулирование // ФТПРПИ. — 1985. — № 3. — С. 59–63.
15. Olkhovskiy D. V., Kuzminykh E. G., Zaitsev A. V., and Semin M. A. Study of heat and mass transfer in ventilation shafts of deep mines in the case of airflow reverse, *J. Physics: Conf. Series, IOP Publish.*, 2021, Vol. 1945, No. 1. — P. 012044.
16. Воропаев А. Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. — М.: Недра, 1966. — 249 с.
17. Шалимов А. В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 329 с.
18. Levin L. Y., Semin M. A., and Zaitsev A. V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of underground excavations, *J. Min. Sci.*, 2014, Vol. 50, No. 2. — P. 371–378.

- 19. Левин Л. Ю., Семин М. А., Зайцев А. В.** Разработка математических методов прогнозирования микроклиматических условий в сети горных выработок произвольной топологии // ФТПРПИ. — 2014. — № 2. — С. 154–161.
- 20. Семин М. А., Левин Л. Ю.** Оценка влияния местных сопротивлений на воздухораспределение в шахтах и рудниках // ФТПРПИ. — 2019. — № 2. — С. 120–130.
- 21. Гришин Е. Л., Кормициков Д. С., Левин Л. Ю.** Использование результатов теплогазодинамического расчета при анализе аварийных ситуаций и разработке плана ликвидации аварий в аналитическом комплексе “АэроСеть” // ГИАБ. — 2014. — № 9. — С. 185–189.
- 22. Св-во о гос. регистрации № 2015610589.** Аналитический комплекс “АэроСеть”: программа для ЭВМ / А. В. Зайцев, Б. П. Казаков, А. В. Кашников, Д. С. Кормициков, Ю. В. Круглов, Л. Ю. Левин, П. С. Мальков, А. В. Шалимов; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН, № 2014613790; заявл. 24.04.2014; опубл. 20.02.2015. — 1 с.

Поступила в редакцию 16/IX 2022

После доработки 25/X 2022

Принята к публикации 19/I 2023