



УДК 622.452

Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года

А.В.ЗАЙЦЕВ, М.А.СЕМИН, О.С.ПАРШАКОВ ✉

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

Как цитировать эту статью: Зайцев А.В. Особенности формирования теплового режима в воздухоподающих стволах в холодный период года / А.В.Зайцев, М.А.Семин, О.С.Паршаков // Записки Горного института. 2021. Т. 250. С. 562-568. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.9

Аннотация. В холодный период года для обеспечения требуемого теплового режима в подземных горных выработках подаваемый в рудник воздух нагревается при помощи систем воздухоподготовки. В дальнейшем термодинамическое состояние подготовленного потока воздуха при опускании его по шахтному стволу изменяется за счет влияния ряда факторов. При этом особый интерес вызывают процессы тепло- и массообмена между поступающим воздухом и окружающей его средой, которые напрямую зависят от начальных параметров нагретого воздуха, глубины воздухоподающего ствола и наличия водопритоков в шахтный ствол. На основании полученных экспериментальных данных и проведенных теоретических исследований выполнен анализ влияния различных тепло- и массообменных факторов на формирование микроклиматических параметров воздуха в воздухоподающих стволах рудников Норильского промышленного района. Показано, что в условиях присутствия внешних водопритоков из закрепного пространства ствола микроклиматические параметры воздуха в стволе определяются теплоотдачей от поступающего потока воздуха к подземной воде, стекающей по крепи воздухоподающего ствола. Результаты исследования позволили описать и объяснить эффект понижения температуры воздуха, поступающего в подземные выработки глубоких рудников.

Ключевые слова: система воздухоподготовки; параметры воздуха; распределение температуры; воздухоподающий ствол; относительная влажность; водоприток; математическое моделирование

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках научного проекта № 19-77-30008.

Введение. В холодное время года для предотвращения обмерзания воздухоподающих выработок и защиты горнорабочих от простудных заболеваний осуществляется подогрев воздуха, поступающего в подземные горные выработки [12]. Согласно требованиям действующих Федеральных норм и правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых, поступающий воздух должен иметь температуру не ниже 2 °С. В связи с этим для формирования и поддержания требуемой температуры воздуха в воздухоподающих стволах рудников (шахт) применяются системы воздухоподготовки [1, 4, 5, 13, 17].

За счет использования на поверхности системы воздухоподготовки параметры поступающего воздуха претерпевают изменения. В результате в холодный период года температура воздуха повышается, а его влажность уменьшается. Следовательно, в холодный период года микроклиматические параметры воздуха на начальном участке ствола вблизи его устья зависят не только от атмосферных условий, но и от параметров работы системы воздухоподготовки. В дальнейшем параметры воздуха при движении вниз по воздухоподающему стволу, изменяются за счет его гидростатического (или адиабатического) сжатия, а также тепло- и массообмена с крепью ствола и окружающим породным массивом [6, 7]. При этом, как показывает практика и на основании существующей литературы [3, 9], основным фактором, определяющим распределение температуры воздуха в глубоком стволе, является гидростатическое сжатие, приводящее к росту температуры воздуха с глубиной. При движении воздуха вниз по стволу в поле действия силы тяжести происходит его значительный разогрев, который хорошо описывается линейным законом изменения температуры воздуха по глубине ствола. Однако результаты экспериментальных измерений, проведенных специалистами Горного института Уральского отделения РАН при участии авторов статьи в воздухоподающих стволах глубоких рудников Норильского промышленного района в холодный период года, показали, что температура поступающего воздуха при его опускании по стволам уменьшается. Следовательно, в холодный период года формирование теплового режима в воздухоподающих стволах может существенно зависеть не только от гидростатического сжатия воздуха, но и от других тепло- и массообменных процессов.



В связи с этим в данной статье предпринята попытка провести анализ влияния различных тепло- и массообменных процессов на термодинамическое состояние воздуха, движущегося по воздухоподающему стволу. Проведение этого исследования важно для понимания закономерностей формирования микроклиматических параметров воздуха в глубоких рудниках и для разработки мероприятий по управлению этими параметрами.

Исследования. В 2019-2020 гг. сотрудниками Горного института УрО РАН проведены комплексные воздушно-депресссионная и температурно-влажностная съемки на нескольких рудниках Норильского промышленного района. Одним из основных этапов съемок являлось детальное исследование аэродинамических и микроклиматических параметров воздуха в воздухоподающих стволах и околоствольных дворах рудников [15]. В ходе экспериментальных работ измерены параметры воздуха в различных участках шахтных стволов, в том числе температура и относительная влажность. Для проведения экспериментальных измерений использовались термовлагомер Fluke 971 (относительные погрешности измерения температуры $\pm 0,5$ °С; влажности $\pm 5,0$ %) и Kestrel 5500 (относительные погрешности измерения температуры $\pm 0,5$ °С; влажности $\pm 2,0$ %).

Натурные измерения выполнялись в холодный период года в следующих точках: в устье воздухоподающего ствола на уровне смешивания воздуха (ниже сопряжения канала со стволом на 20-30 м), поступающего через надшахтное здание и калориферный канал; на сопряжении воздухоподающего ствола с первым вскрывающим горизонтом (околоствольный двор).

В табл.1 представлены параметры воздухоподающих стволов исследованных глубоких рудников и параметры воздуха, поступающего по стволам. Все рассматриваемые стволы оборудованы системами воздухоподготовки.

Таблица 1

Параметры воздухоподающих стволов и поступающего по нему воздуха

Параметр	Воздухоподающие стволы						
	рудника 1				рудника 2		
	1	2	3	4	1	2	3
Длина участка ствола (расстояние между двумя точками), м	799	851	525	738	560	401	430
Диаметр воздухоподающего ствола, м	8,0	8,0	6,5	6,5	8,0	6,0	8,0
Площадь сечения ствола, м ²	50,2	50,2	33,2	33,2	50,2	28,3	50,2
Количество воздуха, проходящего по стволу, м ³ /с	224,7	214,4	184,1	241,4	240,0	253,9	450,1
Температура воздуха в устье ствола, °С	23,5	33,9	20,0	18,8	22,8	12,0	18,3
Относительная влажность в устье ствола, %	8,1	5,2	6,7	7,3	23,3	17,1	11,2
Температура воздуха в околоствольном дворе, °С	20,2	20,3	18,4	16,9	16,0	11,1	14,4
Относительная влажность в околоствольном дворе, %	12,3	15,3	14,5	17,5	41,8	22,9	24,1

Из табл.1 видно, что для всех воздухоподающих стволов температура воздуха, зафиксированная в местах сопряжения стволов с первым вскрывающим горизонтом, ниже температуры воздуха, измеренной в устье стволов. При этом относительная влажность воздуха, наоборот, увеличивается по мере опускания воздуха по стволу. В теплый период года, когда система воздухоподготовки не использовалась, результаты аналогичных измерений в исследуемых стволах рудников Норильского промышленного района показывали обратное – движение воздуха вниз по воздухоподающему стволу характеризуется разогревом воздуха вследствие гидростатического сжатия и уменьшением относительной влажности [7, 13].

Традиционно выделяются следующие основные факторы и термодинамические процессы, определяющие формирование температуры воздуха, движущегося вниз по воздухоподающему стволу [7]: начальная температура и влажность воздуха в устье ствола; теплообмен между окружающим ствол породным массивом и проходящим по стволу воздухом; гидростатическое сжатие и разогрев воздуха при его движении вниз по стволу; массообменные процессы (особенно связанные с процессами влагообмена).

Теплообмен между окружающим ствол породным массивом и проходящим по стволу воздухом, как правило, считается пренебрежимо малым для шахтных стволов, эксплуатируемых



длительное время, за счет формирования в окружающем породном массиве так называемой «тепловыравнивающей рубашки» [2]. В некоторых исследованиях [11, 21, 22] данный фактор, тем не менее, считается важным и требует учета даже для воздухоподающих стволов, эксплуатируемых длительное время.

При опускании воздуха по стволу в результате действия только гидростатического сжатия происходил бы его нагрев, который описывается линейным законом изменения температуры воздуха по глубине ствола – приблизительно 1 °С на каждые 130 м увеличения глубины. Учитывая глубину выше указанных воздухоподающих стволов, минимальный нагрев воздуха должен был достичь 4 °С (ствол 2 рудника 2), а максимальный – 8 °С (ствол 2 рудника 1). Вследствие того, что результаты экспериментальных исследований говорят об обратном эффекте охлаждения воздуха, гидростатическое сжатие является не единственным значимым фактором формирования температуры воздуха по глубине ствола.

Для проведения количественной оценки влияния различных процессов тепло- и массообмена в воздухоподающих стволах дополнительно получена информация об имеющихся водопритоках в стволах. На основании гидрогеологического обследования воздухоподающих стволов рудников специалистами получены суммарные среднечасовые притоки естественной и технической воды в зумпфы: рудник 1, ствол 1 – 1,5, ствол 2 – 1,8, ствол 3 – 1,5, ствол 4 – 1,7 м³/ч; рудник 2, ствол 1 – 0,4, ствол 2 – 0,2, ствол 3 – 6,4 м³/ч. Средняя температура воды 7 °С, она обусловлена естественной геотермией породного массива на уровне водоносных горизонтов.

В исследуемых стволах имеются водопритоки, при этом температура воды отличается от температуры воздуха. Подземные воды, проникающие через негерметичную крепь ствола в выработанное пространство стекают вниз по стенкам и взаимодействуют с движущимся по стволу воздушным потоком. Это взаимодействие выражается как в виде теплообмена более теплого воздуха с менее теплой пленкой воды на стенках крепи ствола, так и в виде массообмена – некоторая масса воды на границе водяного слоя с воздухом может испаряться, приводя к повышению влагосодержания воздуха. Некоторая часть воды может отрываться воздушным потоком и присутствовать в нем в жидком состоянии в виде мелких капель. В холодный период года начальная влажность воздуха, поступающего в воздухоподающий ствол, относительно мала, а потому процесс испарения воды, стекающей по крепи ствола, и увеличения влагосодержания воздуха в стволе должен протекать интенсивно.

В целях полноценного исследования влияния тепло- и массообмена воздуха с подземными водами, проникающими в ствол, на температуру воздуха по глубине воздухоподающих стволов в дополнении к проведенным натурным исследованиям выполнен теоретический анализ.

Математическое моделирование. Натурные измерения микроклиматических параметров воздуха, поступающего на проветривание горных выработок, и результаты обследования шахтных стволов позволили провести параметрическое обеспечение математических моделей процессов тепломассопереноса в воздухоподающих стволах с заданием начальных и граничных условий.

Прежде всего, сделана обобщенная математическая постановка задачи о тепломассопереносе в воздухоподающем стволе с произвольными геометрическими свойствами и физическими параметрами воздуха. В рамках такой постановки рассматривался вертикальный ствол, по которому опускается воздух. Течение воздуха в стволе считается стационарным. Воздух, опускающийся по стволу, обменивается теплотой с различными источниками теплоты в стволе, имеющими постоянную температуру: крепью ствола и грунтовыми водами, попавшими в ствол из породного массива через дефекты (трещины) в крепи и стекающими по крепи ствола. Их влияние учитывалось усредненно посредством единых температуры и коэффициента теплоотдачи на стенке ствола, которые подбирались на основании имеющихся эмпирических данных. Тепловое влияние грунтовых вод состояло в теплоте фазового перехода, поглощаемой средой в результате испарения части воды, а также в конвективном теплопритоке к воздуху с помощью мелких водяных капель, отрывающихся от водяной пленки на крепи ствола и попадающих в воздушный поток.

Уравнение баланса энергии некоторого малого объема воздуха при прохождении им вертикального расстояния Δx записывается следующим образом [23]: $\Delta Q = \Delta I + \Delta A$, т.е. теплота ΔQ , поступающая или уходящая из воздуха, идет на увеличение его теплосодержания ΔI и совершение



силами давления работы ΔA по сжатию воздуха. При детализации входящих в уравнение энергетических величин оно принимает вид [16]:

$$\rho_a c_a \Delta T = \frac{4\alpha \Delta x}{Dv} (T_m - T) - \rho_a L \Delta m_1 + \rho_a c_w (T_m - T) \Delta m_2 + P \Delta \rho, \quad (1)$$

где ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; c_a – удельная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С); L – удельная теплота конденсации воды, Дж/г; ΔT – изменение температуры воздуха при перемещении на Δx , °С; α – коэффициент нестационарного теплообмена с источниками теплоты (крепью и водоприотками) [10], Вт/(м²·°С); v – скорость течения воздуха в стволе, м/с; T_m – температура источников теплоты, °С; T – средняя по сечению температура воздуха, °С; $\Delta m_1 > 0$ – количество испарившейся влаги вследствие изменения термодинамических параметров воздуха на участке Δx , г/кг; $\Delta m_2 > 0$ – количество капельной влаги, захваченной воздушным потоком из водяной пленки, г/кг; c_w – удельная теплоемкость воды, Дж/(г·°С); P – абсолютное давление, Па; $\Delta \rho$ – изменение плотности воздуха, кг/м³.

Части уравнения $\frac{4\alpha \Delta x}{Dv} (T_m - T)$, $\rho_a L \Delta m_1$, $\rho_a c_w (T_m - T) \Delta m_2$ и $P \Delta \rho$ характеризуют теплообмен воздуха с влажной крепью ствола, теплоту испарения влаги с поверхности крепи, конвективный теплоперенос за счет отрыва капельной влаги и гидростатический нагрев воздуха при его опускании вниз соответственно.

Абсолютное давление по глубине ствола меняется по линейному закону:

$$P = P_0 + \rho_0 q x,$$

где P_0 – абсолютное давление на поверхности, Па; ρ_0 – плотность воздуха на поверхности, кг/м³; q – ускорение свободного падения, м/с²; x – координата вдоль оси ствола, отсчитываемая от его устья вниз, м.

Плотность воздуха рассчитывается по формуле:

$$\rho_a = \frac{29P - 0,11\varphi(479 + (11,52 + 1,62T)^2)}{8314(T + 273)}, \quad (2)$$

где φ – относительная влажность воздуха, %.

Изменение влагосодержания воздуха m происходит только за счет испарения влаги $\Delta m = \Delta m_1$.

По мере опускания воздуха по воздухоподающему стволу его относительная влажность изменяется по известному закону:

$$\frac{\varphi}{100\%} = \frac{Pm}{P_n(0,622 + m)}, \quad (3)$$

где P_n – давление насыщенного водяного пара (Па), рассчитываемое по формуле:

$$P_n = 611 \exp\left(\frac{17,5T}{T + 241,2}\right).$$

Из уравнений (3) и (4) следует, что изменение влагосодержания по глубине ствола Δm может быть определено исходя из изменений температуры, давления и относительной влажности воздуха.

Если теперь в самом простом случае рассмотреть $\Delta x = H$ и подставить в уравнение (1) значения измеренных температур и относительных влажностей воздуха, а также известные числовые выражения для физических свойств воды и воздуха, то для ствола 1 рудника 1 получим:

$$\begin{aligned} -1,26 \cdot 1005 \cdot 3,3 = \frac{4 \cdot 11,15 \cdot 799}{8 \cdot 4,47} (7 - 21,85) - 1,25 \cdot 2258 \cdot 0,0334 + 1,26 \cdot 4,2(7 - 21,85) \Delta m_2 + \\ + 106224 \cdot 0,129. \end{aligned} \quad (5)$$



В качестве среднего барометрического давления, средней температуры и средней плотности воздуха на участке ствола принимались величины, равные среднему арифметическому соответствующих физических параметров воздуха, измеренных в начале и конце участка ствола. В качестве температуры стенки крепи T_m использовалась температура 7 °С. Изменение плотности воздуха рассчитывалось из формулы (2) по известным значениям температуры, давления и влажности воздуха в начале и конце участка [8, 14, 19].

Коэффициент теплоотдачи воздуха и влажной поверхности крепи рассчитывался по формуле А.Н.Щербаня [18] с коэффициентом $k = 1,5$, учитывающим интенсификацию теплоотдачи ввиду наличия водяной пленки на поверхности крепи [20]. В результате решения уравнения (5) относительно Δt_2 получено, что количество влаги, переходящее из водяной пленки в воздушную среду и остающееся в жидкой фазе, составляет 38,5 г/кг. При этом количество влаги, переходящее из водяной пленки в воздушную среду за счет испарения, составляет 0,0335 г/кг.

В табл.2 представлено соотношение влияния различных тепломассобменных процессов, происходящих в исследуемых стволах, в формировании конечной температуры воздуха в околоствольном дворе рудника. Влияние I рассчитывалось как отношение теплоты, привносимой или отводимой от системы рассматриваемым фактором, к изменению внутренней энергии системы (воздушного потока):

$$I = \frac{W_i}{\rho_a c_a \Delta T} \cdot 100 \%,$$

где W_i – теплота от i -го теплового фактора.

Таблица 2

Соотношение влияния тепломассобменных процессов на температуру воздуха в околоствольных дворах рудников

Фактор	Влияние теплообменных процессов, %						
	Стволы рудника 1				Стволы рудника 2		
	1	2	3	4	1	2	3
Теплообмен с влажной крепью ствола	332,5	127,2	489,5	480,0	100,2	243,2	88,9
Испарение влаги с поверхности крепи	1,9	1,1	18,1	18,7	13,0	13,7	10,3
Конвективный теплоперенос за счет отрыва капельной влаги	78,6	82,8	23,8	106,7	122,1	419,2	169,2
Гидростатический нагрев воздуха	-313,0	-111,1	-431,4	-505,4	+135,2	-576,1	-168,4

Примечание. Плюс означает, что рассматриваемый фактор способствует и содействует фактически наблюдаемому понижению температуры воздуха с глубиной, а минус – что фактор, напротив, направлен на повышение температуры воздуха с глубиной, т.е. имеет место противодействие фактически наблюдаемому понижению температуры воздуха.

Всего рассматривалось четыре тепловых фактора, учитываемых моделью (1) и перечисленных ранее: теплообмен с влажной крепью ствола, испарение влаги с поверхности крепи, конвективный теплоперенос за счет отрыва капельной влаги, гидростатический нагрев воздуха. Суммарное влияние всех процессов для каждого из стволов составляет 100 %, т.е. изменение температуры воздуха полностью происходит за счет действия процессов.

Из табл.2 следует, что для рудника 1 ключевыми факторами являются теплообмен с крепью ствола и гидростатический нагрев воздуха, обусловленный его сжатием. Они имеют разнонаправленное действие и практически полностью компенсируют влияние друг друга. Из-за этого фактор конвективного теплопереноса за счет отрыва капельной влаги несмотря на то, что его относительный вклад в несколько раз меньше, становится также значимым. Для рудника 2 фактор конвективного теплопереноса за счет отрыва капельной влаги более значим – это связано с тем, что глубина стволов рудника 2 меньше, чем рудника 1, также это связано с высокими перепадами температуры в стволах 1 и 3 и высоким расходом воздуха в стволе 2. Для стволов обоих рудников влияние испарения влаги с поверхности крепи на температуру воздуха в стволе пренебрежимо мало.



Заключение. Представлены результаты натуральных измерений температуры и относительной влажности воздуха, поступающего по воздухоподающим стволам в холодный период года. Показано, что при опускании нагретого воздуха по стволу происходит его охлаждение за счет значительного влияния тепломассообменных процессов. Представлена математическая постановка задачи тепломассообмена поступающего воздуха с окружающей его средой. Произведены расчеты теплораспределения в воздухоподающем стволе с учетом влияния различных тепловых факторов. Приведено соотношение влияния различных тепломассообменных процессов, происходящих в воздухоподающих стволах, на распределение температуры воздуха по глубине ствола.

Разработанная и параметризованная математическая модель позволила описать и объяснить эффект понижения температуры воздуха в воздухоподающих стволах глубоких рудников в условиях наличия водопритоков в стволы из закрепного пространства – компенсация нагрева воздуха за счет гидростатического сжатия происходит в результате совместного действия двух процессов: теплообмена воздуха с влажной крепью ствола и конвективного теплопереноса за счет отрыва капельной влаги. Влияние испарения влаги с поверхности крепи пренебрежимо мало.

ЛИТЕРАТУРА

1. Анализ работы системы воздухоподготовки на руднике БКПРУ-2 / А.В.Николаев, Н.И.Альменко, А.М.Седунин и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 2. С. 255-264.
2. Бойко О.А. Исследование влияния теплоуравняющей оболочки пород горного массива на величину притока теплоты в горную выработку глубокой шахты Донбасса / О.А.Бойко, В.А.Бойко // Научный вестник Национального горного университета. 2011. № 3. С. 98-106.
3. Влияние микроклиматических параметров воздуха на элементы крепи и армировки в стволах калийного рудника / В.В.Тарасов, В.С.Пестрикова, О.В.Иванов, А.Н.Чистяков // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2020. № 2. С. 174-183.
4. Газизуллин Р.Р. Разработка систем воздухоподготовки для обогрева шахтных стволов в нормальном и реверсивном режимах проветривания рудников / Р.Р.Газизуллин, Л.Ю.Левин, Ю.А.Клюкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № S7. С. 19-25.
5. Гендлер С.Г. Управление тепловым режимом железнодорожных тоннелей, расположенных в суровых климатических условиях / С.Г.Гендлер, С.В.Синявина // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 7. С. 32-38.
6. Дударь Е.С. Расчет параметров микроклимата с учетом конденсации влаги в рудничной вентиляционной сети / Е.С.Дударь, О.И.Дударь, Н.Н.Мохирев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № S7. С. 331-344.
7. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пермь: Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, 2019. 24 с.
8. Зайцев А.В. Разработка способов нормализации микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2013. 32 с.
9. Казаков Б.П. Теплообмен вентиляционного воздуха с крепью воздухоподающего ствола и породным массивом / Б.П.Казаков, А.В.Шалимов, Е.Л.Гришин // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 91-99.
10. Кобылкин С.С. Методологические основы системного проектирования вентиляции шахт: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», 2018. 34 с.
11. Красноштейн А.Е. Моделирование процессов нестационарного теплообмена между рудничным воздухом и массивом горных пород / А.Е.Красноштейн, Б.П.Казаков, А.В.Шалимов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2007. № 5. С. 77-85.
12. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки шахт и рудников: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2010. 30 с.
13. Левин Л.Ю. Использование газовых теплогенераторов в системах обогрева воздухоподающих стволов калийных рудников / Л.Ю.Левин, Б.П.Казаков // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 10. С. 55-59.
14. Мальцев С.В. Исследование и разработка способов определения аэродинамических параметров сложных вентиляционных систем подземных рудников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2020. 32 с.
15. Мальцев С.В. Метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов медно-никелевых рудников / С.В.Мальцев, М.А.Семин, Д.С.Кормщиков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2020. № 6. С. 170-178. DOI: 10.15372/FTPRPI20200615
16. Моделирование динамики тепловых депрессий и ее влияния на проветривание горных выработок / А.В.Шалимов, Д.С.Кормщиков, Р.Р.Газизуллин, М.А.Семин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. 2014. № 12. С. 41-47. DOI: 10.15593/2224-9923/2014.12.5



17. Результаты моделирования процесса проветривания рудника при расположении воздушной завесы в воздухоподающем и вентиляционном стволах / А.В.Николаев, Н.И.Алыменко, А.А.Каменских и др. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. № 3. С. 291-300. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.10
18. Хохолов Ю.А. Температурный режим многолетнемерзлого горного массива при ведении проходческих работ / Ю.А.Хохолов, Д.К.Соловьев // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 4. С. 177-182.
19. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Пермь: Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, 2012. 32 с.
20. Naphon P. Study on the heat transfer characteristics of the annular fin under dry-surface, partially wet-surface, and fully wet-surface conditions // International communications in heat and mass transfer. 2006. Vol. 33. Iss. 1. P. 112-121. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.08.009
21. Roghanchi P. Quantifying the thermal damping effect in underground vertical shafts using the nonlinear autoregressive with external input (NARX) algorithm / P.Roghanchi, K.C.Kocsis // International Journal of Mining Science and Technology. 2019. Vol. 29. Iss. 2. P. 255-262. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.06.002
22. Scalise K.A. Managing Heat in Underground Mines: the Importance of Incorporating the Thermal Flywheel Effect into Climatic Modeling / K.A.Scalise, M.B.Teixeira, K.C.Kocsis // Mining, Metallurgy & Exploration. 2021. Vol. 38. P. 575-579. DOI: 10.1007/s42461-020-00323-5
23. Semin M. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. / M.Semin, A.Zaitsev // Thermal Science and Engineering Progress. 2020. Vol. 20. № 100760. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760

Авторы: **А.В.Зайцев**, д-р техн. наук, заведующий сектором, aerolog.artem@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2314-0482> (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), **М.А.Семин**, канд. техн. наук, научный сотрудник, seminma@outlook.com, <https://orcid.org/0000-0001-5200-7931> (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия), **О.С.Паршаков**, младший научный сотрудник, olegparshakov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-5545-442X> (Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.12.2020.

Статья принята к публикации 27.07.2021.