DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

УДК 622.411

# РАЗРАБОТКА ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОМФОРТНЫХ МИКРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПРИ ВЕДЕНИИ ГОРНЫХ РАБОТ

**Б.П.КАЗАКОВ, Л.Ю.ЛЕВИН, А.В.ШАЛИМОВ, А.В.ЗАЙЦЕВ**
*Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия*

Проанализированы факторы естественного и техногенного происхождения, влияющие на свойства рудничной атмосферы, определяющие уровень безопасности горных работ и возможность возникновения аварийных ситуаций. Обозначены основные направления в развитии энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий. Представлен комплекс разработанных методов и математических моделей для проведения аэрологических и теплофизических расчетов. Определены направления совершенствования методов расчета стационарного и нестационарного воздухораспределения: использование эжекторных источников тяги для организации рециркуляционного проветривания; учет потерь депрессии на сопряжениях горных выработок; влияние инерционности воздушных потоков и отработанных пространств рудника при моделировании переходных аварийных процессов. На основе алгоритма расчета распределения расходов воздуха в рудничной сети разработан метод обработки результатов воздушно-депрессионных съемок в условиях дефицита данных. Смоделированы процессы переноса пыли с учетом ее коагуляции и оседания, а также взаимодействия с каплями воды при влажном обеспыливании воздуха. Разработана методика расчета интенсивности испарения и конденсации влаги, позволяющая прогнозировать время, протяженность и количество выпадаемой влаги и ее миграцию вглубь рудника в зимний период. По результатам решения задачи теплообмена рудничного воздуха и крепи воздухоподающего ствола в сопряженной постановке определяются величина депрессии естественной тяги и условия конвективной устойчивости движения воздушных потоков. Нормализация микроклиматических параметров рудничной атмосферы прогнозируется при использовании теплообменных установок, работающих на нагревание, либо на охлаждение и осушение вентиляционного воздуха. Изложены алгоритмы, позволяющие минимизировать затраты энергии на проветривание как на стадии проектирования рудника, так и в процессе его эксплуатации.

***Ключевые слова*:** энергосберегающие технологии, воздухораспределение, тепло- и массоперенос, рудничный микроклимат, управление проветриванием

***Как цитировать эту статью*:** Разработка энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ / Б.П.Казаков, Л.Ю.Левин, А.В.Шалимов, А.В.Зайцев // Записки Горного института. 2017. Т. 223. С. 116-124. DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

**Введение.** Состояние рудничной атмосферы определяется пятью основными параметрами воздуха – расходом, температурой, влажностью, загазованностью и запыленностью. Параметры зависят от множества факторов, имеют разные величины в разных точках вентиляционной сети и меняются со временем. Каждая из перечисленных характеристик воздуха определяет комфортные условия ведения горных работ и имеет предельно допустимые значения, выход за пределы которых означает возникновение аварийных ситуаций, угрожающих безопасности людей и сохранности оборудования.

Современные рудники представляют собой сложные динамические системы, изменения в которых происходят как под действием естественных факторов, к которым относятся температура и влажность атмосферного воздуха, так и в результате техногенного воздействия. Искусственные изменения возможны в результате деятельности человека: разработка новых горизонтов, добавление новых рабочих участков, выработок, вентиляционных сбоек, перемычек, источников тяги и т.д. Все это оказывает влияние на движение, чистоту и термодинамические характеристики воздуха в отдельных выработках и в руднике в целом, а изменения должны быть предсказуемыми во избежание возникновения аварийных ситуаций. Очевидно, что каждая из названных характеристик воздуха зависит не только от процессов, протекающих непосредственно в воздухе, но и от процессов тепло- и массопереноса в породном массиве и шахтном оборудовании, с которыми контактирует воздушный поток. Воздух приводится в движение вентиляторами различного типа, обменивается теплом с породным массивом, взаимодействие с которым приводит также к изменению влагосодержания (испарение – конденсация) и загазованности (выделение газа и сорбция), нагревается калориферными и охлаждается холодильными установками, нагревается, насыщается пылью и вредными примесями в рабочих зонах от работающих комбайнов. Таким образом, система «рудничный воздух – породный массив – шахтное оборудование» явля-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

ется взаимосвязанной, и точное выделение из нее подсистемы, имеющей отношение непосредственно к воздуху, невозможно. При моделировании такой системы должен использоваться широкий спектр физико-математических моделей с увязкой в единой программной среде для получения максимально полной и точной картины исследуемого процесса.

Энергосберегающие технологии обеспечения комфортных микроклиматических условий при ведении горных работ разрабатываются в отделе аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН на основе развития моделей рудничных аэрологических процессов по четырем основным направлениям: 1) совершенствование методов расчета стационарного воздухораспределения и аэродинамических характеристик вентиляционных сетей горно-добывающих предприятий; 2) моделирование процессов тепло- и массопереноса в воздухе и породном массиве; 3) разработка методов моделирования быстропротекающих аварийных процессов; 4) разработка энергосберегающих способов управления проветриванием. Существует тенденция интеграции всех направлений с целью представления проветривания как единого аэротеплогазодинамического процесса. В связи с бурным развитием вычислительной техники в последние десятилетия достигнут значительный прогресс в комплексном многофакторном моделировании подземных аэрологических процессов, особенно в реализации численных методов расчета и практическом использовании результатов применительно к обеспечению безопасных условий ведения горных работ. Первое направление моделирования, связанное с решением сетевых задач воздухораспределения, является базовым, поскольку разработка моделей второго (тепло- и массоперенос) и четвертого (управление вентиляцией) направлений в конечном итоге приводит к необходимости их сетевой адаптации, а третье направление является доработкой первого с учетом инерционных свойств воздушных потоков и сжимаемости воздуха в отработанных пространствах рудников. В настоящее время соразмерно значительному увеличению мощности вычислительной техники получают распространение более надежные и быстро сходящиеся методы численного решения системы сетевых уравнений, имеющие гарантированную и быструю сходимость, но требующие значительных объемов оперативной памяти [5].

Если скорость протекания исследуемого аэрологического процесса невелика, то для его моделирования используется квазистационарное приближение. Процесс представляется дискретной последовательностью стационарных состояний, рассчитываемых многократно на каждом шаге по времени с обновляемыми текущими параметрами. Большинство моделей, относящихся к штатному режиму проветривания рудников, используется для практических расчетов именно в этом приближении. Главным фактором, определяющим динамику тепловых депрессий в руднике, является теплообмен движущегося по выработкам воздуха с породным массивом. Поскольку интенсивность теплообмена зависит от того, насколько быстро и глубоко температурные изменения проникают вглубь породы, то и задача расчета теплопереноса в массиве оказывается относящейся непосредственно к моделированию аэрологических процессов.

**Методы и модели.** В соответствии с принятой концепцией комплексного учета факторов при моделировании структура разработанных и совершенствующихся математических моделей и методов расчета рудничных аэрологических процессов представляется следующим образом.

1. Развитие методов прогнозирования движения воздушных потоков по горным выработкам идет по пути учета максимального количества естественных и техногенных факторов, определяющих динамику воздухораспределения в рудничной сети.

• Моделирование работы эжекторных установок для организации рециркуляционного проветривания позволяет добиться значительного улучшения вентиляции рабочих зон при минимальных затратах электроэнергии [2, 4, 14].

На рис.1 и 2 представлены результаты различных вариантов расчета производительности $Q_2$ эжекторной установки в выработке сечением 8 м$^2$ на базе вентилятора ВМ-12А без конфузора в зависимости от сечения камеры смешения $S$ при различных значениях сопротивления участка проветривания $R_{34}$ (в киломюргах) – суммарного сопротивления параллельных участков – рабочего 4 и утечек 3. Сопротивление сети $R_1$ до вентиляционной сбойки, в которой размещается эжекторная установка, принято равным 0,01 кμ, депрессия ГВУ – 500 мм вод. ст. Расчеты базировались на модели эжекции, построенной на законе сохранения количества движения, с поправками на потерю импульса при сужении – расширении потока воздуха камерой смешения [4]. Из анализа результатов следует (рис.2), что для представленной схемы (рис.1) эжекторная ус-

**DOI:** 10.18454/PMI.2017.1.116

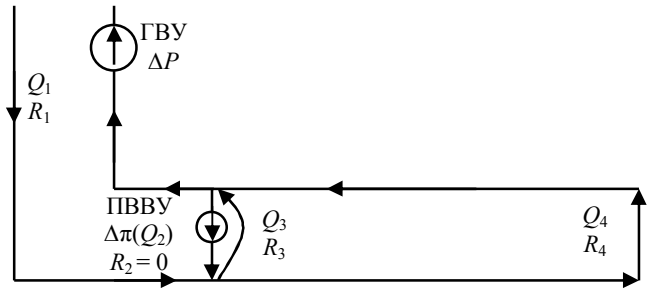



Рис.1. Схема проветривания рудника с дополнительным вентилятором

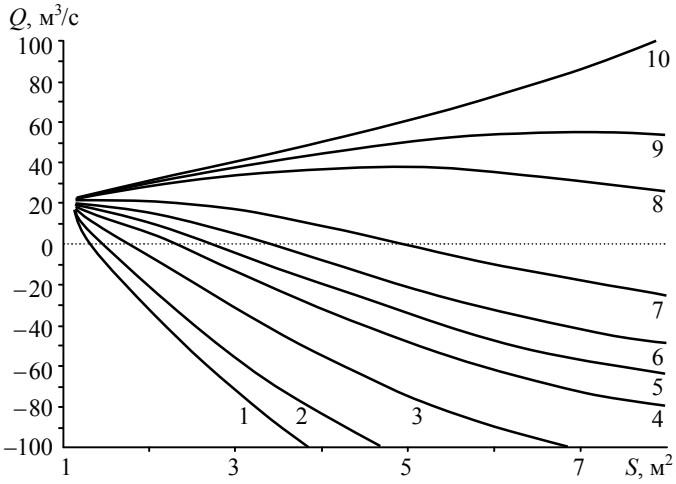



Рис.2. Производительность эжекторной установки в зависимости от сечения камеры смешения при разных значениях суммарного аэродинамического сопротивления $R_{34}$

1 – $R_{34}$ = 0,01 кμ; 2 – 0,005; 3 – 0,002; 4 – 0,001; 5 – 0,0007; 6 – 0,0005; 7 – 0,0003; 8 – 0,0001; 9 – 0,00004; 10 – 0,00001

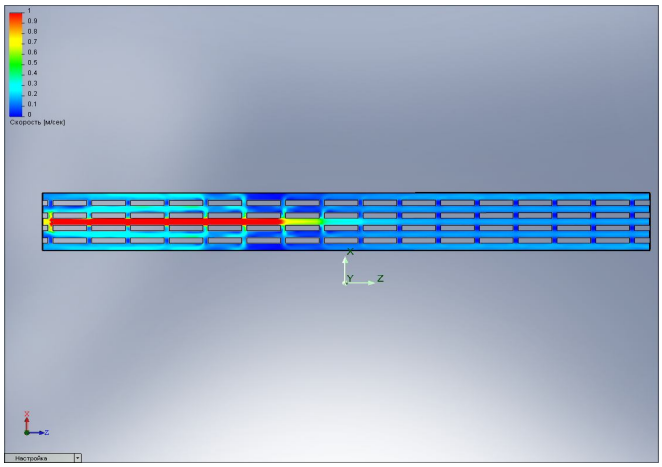


Рис.3. Скорость движения воздуха в группе пяти параллельных открытых выработок диаметром 10 м, сбитых через 50 м, проветриваемых вентилятором-эжектором ВМЭ-12А

тановка на базе вентилятора ВМ-12А будет работать эффективнее этого же вентилятора, установленного в перемычке, при сопротивлениях участка проветривания $R_{34} < 0{,}0001$ кμ, т.е. при $R_1/R_{34} > 100$. В противном случае использование эжекторной установки положительного эффекта не дает.

• Потери депрессии на сопряжениях горных выработок оказываются значительными в местах сопряжения стволов с горизонтами и калориферными каналами, а также на любых сопряжениях горных выработок больших сечений.

Из результатов численных экспериментов следует, что с ростом размеров и сложности вентиляционных сетей влияние сопротивлений сопряжений на воздухораспределение усиливается. Вклад сопротивлений сопряжений в распределение воздухопотоков возрастает также с увеличением сечения выработок $S_i$. Объясняется это тем, что линейные сопротивления выработок обратно пропорциональны $S_i^{2.5}$ [15], в то время как для сопряжений $R_i \sim 1/S_i^2$. С ростом $S_i$ линейные сопротивления уменьшаются, а долевой вклад узловых сопротивлений растет. Полученные аналитические зависимости для расчета местных аэродинамических сопротивлений [11] позволяют аналитически моделировать воздухораспределение в таких местах рудника, где стандартные методы расчета непригодны (рис.3).

• Инерционность воздушных потоков проявляет себя при моделировании аварийных процессов, связанных с рудничными пожарами, отключениями и реверсированиями главной вентиляционной установки [7, 17].

Отличительной особенностью аварийных процессов является сильная нестационарность, когда скорость движения воздушных потоков в считанные секунды значительно меняется по величине и, возможно, по направлению. Как правило, такие нестационарные процессы являются переходными, поскольку за короткий промежуток времени один стационарный (или квазистационарный) режим проветривания сменяется другим. А поскольку в процессе этого перехода разгоняется или тормозится значительная масса воздуха, то пренебрежение инерционностью этой массы дает тем большую ошибку, чем меньшее время занимает переходный процесс (рис.4).

• Влияние отработанных пространств на переходные процессы нестационарного воздухораспределения после останова или реверса главной вентиляционной установки может быть смо-

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

делировано лишь на основе решения общей системы уравнений, так как специализированные методы расчета сетевых уравнений оказываются непригодными для описания движения сжимаемой среды [10].

Наличие больших отработанных пространств в рудниках никак не проявляется в стационарных режимах проветривания. Во время переходных вентиляционных процессов, обусловленных быстрыми изменениями депрессий источников тяги (остановка или реверсирование), влияние отработанного пространства на динамику воздушных потоков может быть весьма существенным. Миллионы кубометров воздуха под землей являются своего рода аккумуляторами давления, которое сохраняет свое значение за счет сжатия – расширения воздуха в течение нескольких минут после отключения или реверсирования вентилятора. При этом воздух двигается как сжимаемая среда и может входить или выходить из рудника по всем стволам, формально нарушая тем самым первый закон сетей, используемый при моделировании воздухораспределения в приближении несжимаемости воздуха.

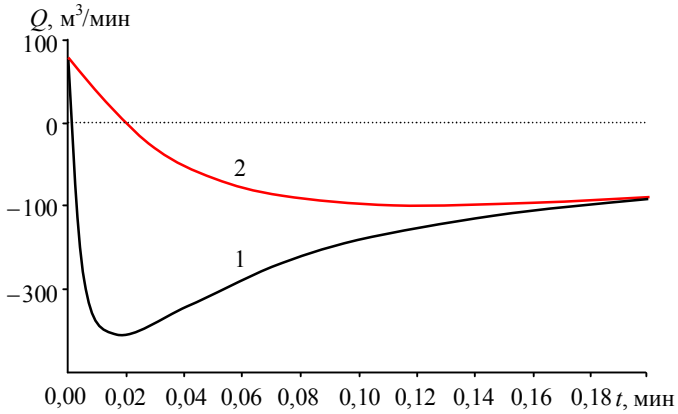



Рис.4. Расчетные изменения расхода воздуха в наклонной выработке после возникновения в ней пожара (100 МВт на 10 м)
1 – без учета; 2 – с учетом инерции воздуха

Принятие ненулевого баланса расходов воздуха $Q$ в узлах позволяет смоделировать влияние отработанных пространств на динамику воздушных потоков в переходных режимах проветривания рудников:

$$\sum_j Q_j^{(k)} = -\frac{\Delta P^{(k)}}{2P_{\text{атм}}\Delta t}\sum_j L_j^{(k)} S_j^{(k)},$$

где суммирование ведется по $j$-м выработкам, инцидентным $k$-му узлу; $L$ и $S$ – их длины и сечения, м и м$^2$; $\Delta P$ – изменение давления воздуха в узле за время $\Delta t$ (с); $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па.

• Методика определения аэродинамических сопротивлений горных выработок по результатам воздушно-депрессионных съемок основывается на алгоритме расчета распределения расходов воздуха в условиях дефицита данных [1, 12].

При выборе количества датчиков и мест их размещения следует руководствоваться принципом обеспечения прогнозирования воздухораспределения в руднике минимальным числом датчиков. Это позволяет обеспечить функциональность и надежность определения расходов воздуха при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах на построение системы и ее работу в целом (рис.5).

2. Описание процессов переноса вредных примесей в большинстве случаев оказывается наиболее реалистичным на основе модели идеального вытеснения, в рамках которой частицы газа или дыма пассивно переносятся воздушным потоком с возможностью сорбции поверхностью породного массива. Распространение пыли моделируется с учетом ее коагуляции и оседания, а также взаимодействия с каплями воды при влажном обеспыливании воздуха [13].

Для определения концентрации пыли в воздухе при его движении по горной выработке под действием указанных факторов получена аналитическая зависимость, позволяющая оценивать эффективность систем пылеподавления:

$$C = C_0 \exp\left\{-\left[\frac{4{,}88}{Pe}\sqrt{203{,}77+\left(\frac{a\text{Pe}}{V}\right)^2\left(\frac{7Ah}{a}\right)^{4/7}}-\frac{66{,}77}{\text{Pe}}\right]\frac{X}{h}\right\},$$

где $a \equiv \frac{2}{9}\frac{g(\rho-\rho_в)}{\rho_в \nu_m}$ – постоянная Стокса, 1/(м·с); $A \equiv \frac{D\mu r_o^3}{\rho_в RT}\Delta P$, м$^5$/с; $\text{Pe} \equiv \frac{Vh}{D_m}$ – турбулентный критерий Пекле; $V$ – скорость потока, м/с; $h$ – высота выработки, м; $D$ – коэффициент молекуляр-

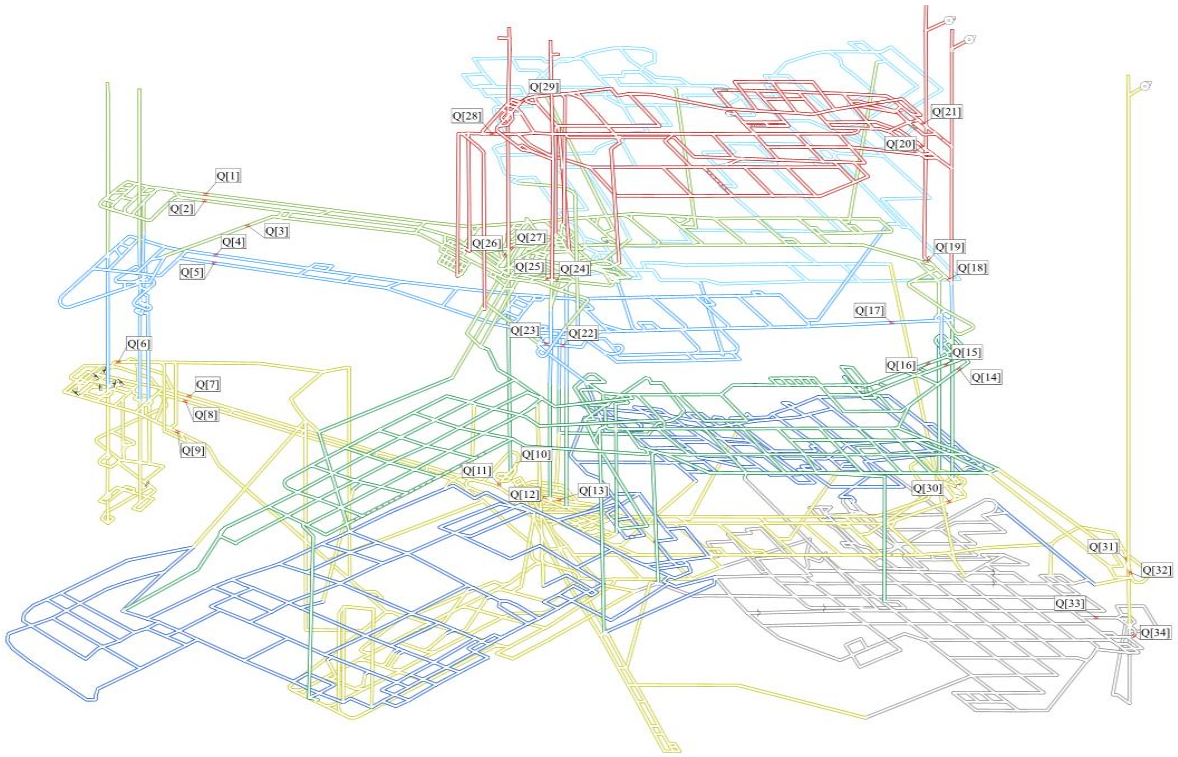



Рис.5. Места установки автоматических замерных станций в вентиляционной сети рудника «Таймырский»

ной диффузии водяных паров к частице, м$^2$/с; μ – молярная масса паров воды, кг/моль; $R$ – универсальная газовая постоянная; $T$ – абсолютная температура воздуха, К; ρ – плотность вещества пыли, кг/м$^3$; $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м$^3$; $r_о$ – начальный размер частиц пыли, м; $\Delta P$ – начальное понижение упругости водяных паров над частицей, Па; $\nu_m$ и $D_m$ – коэффициенты турбулентной вязкости и диффузии, м$^2$/с.

3. Перенос влаги, в отличие от газа и пыли, тесно связан с температурой воздуха, изменяющейся по ходу его движения. Но основе предварительного расчета температурных изменений воздуха определяются интенсивности испарения и конденсации влаги, позволяющие прогнозировать время, протяженность и количество выпадающей влаги и ее миграцию по выработкам в зимний период [6].

В большинстве шахт воздух, вбирая в себя влагу по ходу движения, к концу пути сильно увлажняется и при подходе к вентиляционному стволу имеет относительную влажность порядка 90-95 %. В условиях рудника «Скалистый» воздух имеет температуру 18 °С, влажность 90 %, и далее поднимается на высоту более 1 км. При этом в результате гидростатического охлаждения воздуха с определенной отметки, где влажность достигает 100 %, начинается интенсивная конденсация влаги с выделением тепла, компенсирующего охлаждение воздуха под действием разрежения. На рис.6 представлены результаты модельного расчета и замерные точки этого термодинамического эффекта, свидетельствующие о том, что неучет дополнительного выделения тепла при конденсации приводит к возникновению погрешности в 4 °С в сторону уменьшения температуры. Эта погрешность может приводить к серьезным ошибкам при определении величины общешахтной естественной тяги, которая влияет на интенсивность проветривания рудника и через расходы воздуха по выработкам – на протекающие в них теплофизические процессы.

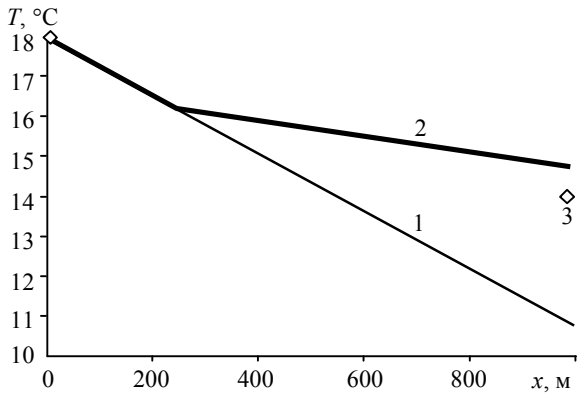



Рис.6. Результаты расчета температуры воздуха в вентиляционном стволе без учета (1) и с учетом (2) выделения тепла при конденсации влаги; 3 – результаты экспериментальных измерений

DOI: 10.18454/PMI.2017.1.116

Анализ натурных наблюдений и результатов численного моделирования влагообменных процессов в калийных рудниках свидетельствует о том, что процесс зимней миграции конденсационных рассолов вглубь рудника неизбежен, действует на расстоянии до 3 км от воздухоподающих стволов и приводит к переносу примерно 1/10 части выпавшей за лето влаги. Поэтому единственный способ борьбы с этим явлением – осушение воздуха в теплый период года в системах воздухоподготовки, в качестве которых могут использоваться калориферные установки, работающие на охлаждение. Оценочные расчеты показывают, что при включении калориферной установки количество удаленной из воздуха влаги в течение летнего периода может достигать 6000 т в год, что значительно уменьшает объем и зону ее выпадения на почву выработок и последующую миграцию вглубь рудничного поля.

4. Приближенно перенос тепла воздухом может быть описан моделью идеального вытеснения с заданным коэффициентом теплообмена с породным массивом или в сопряженной постановке. Должны также учитываться специфические эффекты теплового режима воздуха в стволах – геотермическое увеличение температур пород с глубиной и разогрев воздуха в результате его гидростатического сжатия.

• Коэффициент теплообмена не является величиной заданной и постоянной. Определяется он либо с помощью аналитических зависимостей различного уровня сложности, либо на основании точного решения задачи теплообмена в сопряженной постановке [7].

Процессы теплообмена между вентиляционным воздухом и породным массивом оказывают значительное влияние на формирование рудничного микроклимата. Вследствие теплообмена ощутимые (в несколько градусов) сезонные и суточные колебания температуры вентиляционного воздуха происходят лишь в пределах 1-2 км от мест сопряжения воздухоподающих стволов с горизонтами. На большем удалении воздух принимает температуру породного массива, в результате чего устанавливаются постоянные климатические параметры, которые не меняются в течение всего года. Наиболее интенсивно процессы теплообмена рудничного воздуха с породным массивом протекают в воздухоподающих стволах (рис.7).

• Сложная динамика тепловых депрессий описывается моделью расслоения воздушных потоков по сечению горных выработок, с помощью которой удается получить аналитически адекватную реальности картину движения воздуха в зоне рудничных пожаров, а также в стволах после отключения главного вентилятора [9, 18].

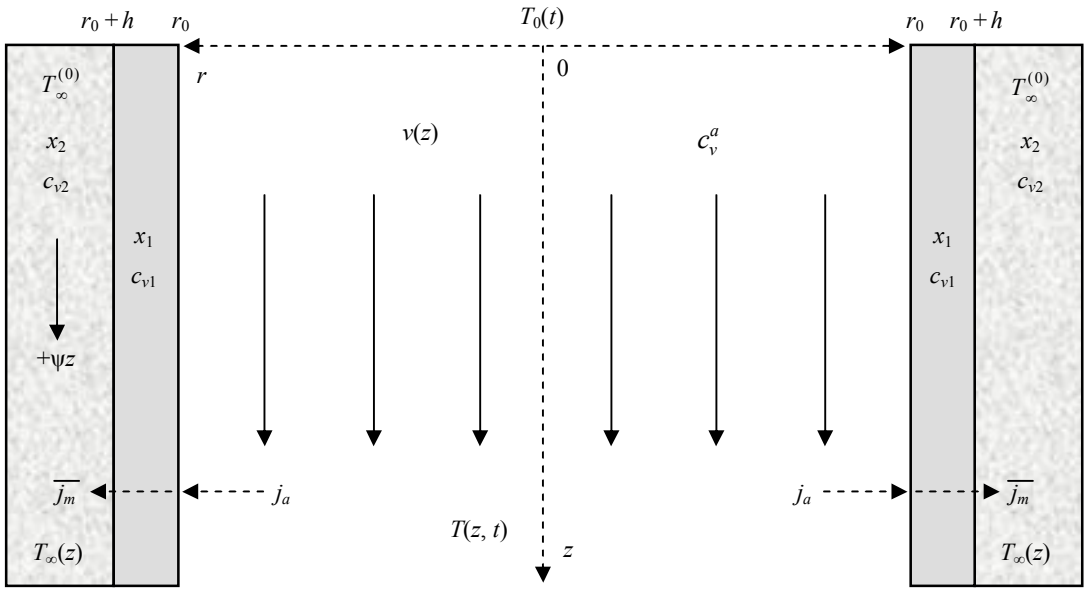



Рис.7. Двухслойная задача теплообмена рудничного воздуха с крепью воздухоподающего ствола

$r$ и $z$ – радиальная и вертикальная координаты, м; $t$ – время, с; $c_v^a$, $c_{v1}$ и $c_{v2}$ – объемные теплоемкости воздуха, первого (чугун) и второго (бетон и горный массив) слоев, Дж/м$^2$/с; $x_1$ и $x_2$ – температуропроводности первого (чугун) и второго (бетон и горный массив) слоев, м$^2$/с; $r_0$ – радиус ствола, м; $h$ – толщина первого слоя, м; $v(z)$ – скорость движения воздуха, м/с; $T_\infty^{(0)}$ – среднегодовая температура воздуха, °С; $T_\infty(z) = T_\infty^{(0)} + \psi z$ – температура «непотревоженного массива», °С; $1/\psi$ – величина геотермической ступени, м; $T_0(t)$ – температура наружного воздуха, °С; $T(t, z)$ – текущая температура воздуха на глубине $z$, °С; $j_a$ и $j_m$ – плотности потока тепла в воздухе к границе и в массиве от границы, Дж/(с·м$^2$)

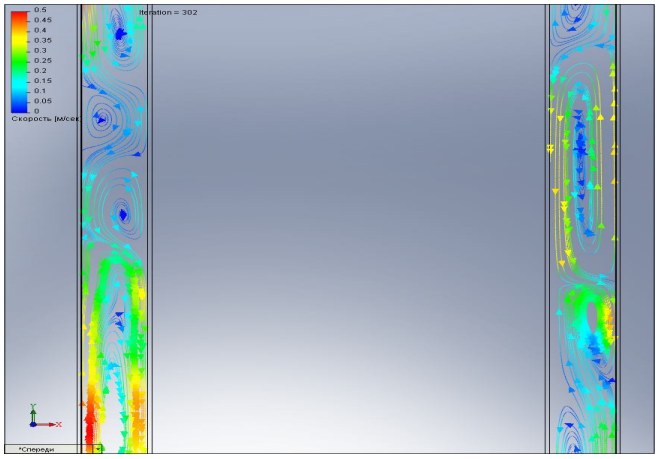


Рис.8. Конвективное движение воздушных потоков в стволах после отключения источника тяги

В случае возникновения пожара в руднике одной из возможных мер, принимаемых для ликвидации возгорания и недопущения распространения по выработкам продуктов горения, является останов вентилятора, после чего единственным источником поступления воздуха в рудник становится естественная тяга. Несмотря на изученность вопроса воздействия естественной тяги на движение воздуха по горным выработкам, этот вариант проветривания применительно к рудникам с одноуровневыми стволами остается неисследованным. Однако, как показывают экспериментальные и модельные исследования, в определенных условиях проветривание рудника после отключения вентилятора сохраняется приблизительно в количестве 1/10 от первоначального расхода воздуха. Движение воздуха в стволах при этом носит весьма неоднозначный, плохо предсказуемый характер (рис.8).

• Для нормализации микроклиматических параметров рудничной атмосферы используются теплообменные установки, работающие либо на нагревание, либо на охлаждение и осушение вентиляционного воздуха [3].

В ходе математического моделирования тепло- и влагообменных процессов, протекающих между воздухом и жидкостью, выведены аналитические зависимости для расчета распределения температур воздуха и теплоносителя по длине теплообменных трубок, а также мест конденсации влаги на поверхности при охлаждении воздуха (рис.9). Полученные формулы позволяют рассчитывать как локальные характеристики – прогнозные места замерзания воды при нагревании воздуха и начала конденсации влаги из воздуха при его охлаждении, так и характеристики интегральные – среднюю температуру воздуха на выходе и тепловую мощность установки. На основании последующего анализа зависимости этих характеристик от расположения и подключения теплообменных модулей, а также от направления и мест подачи жидкости делаются выводы об оптимальной конфигурации системы.

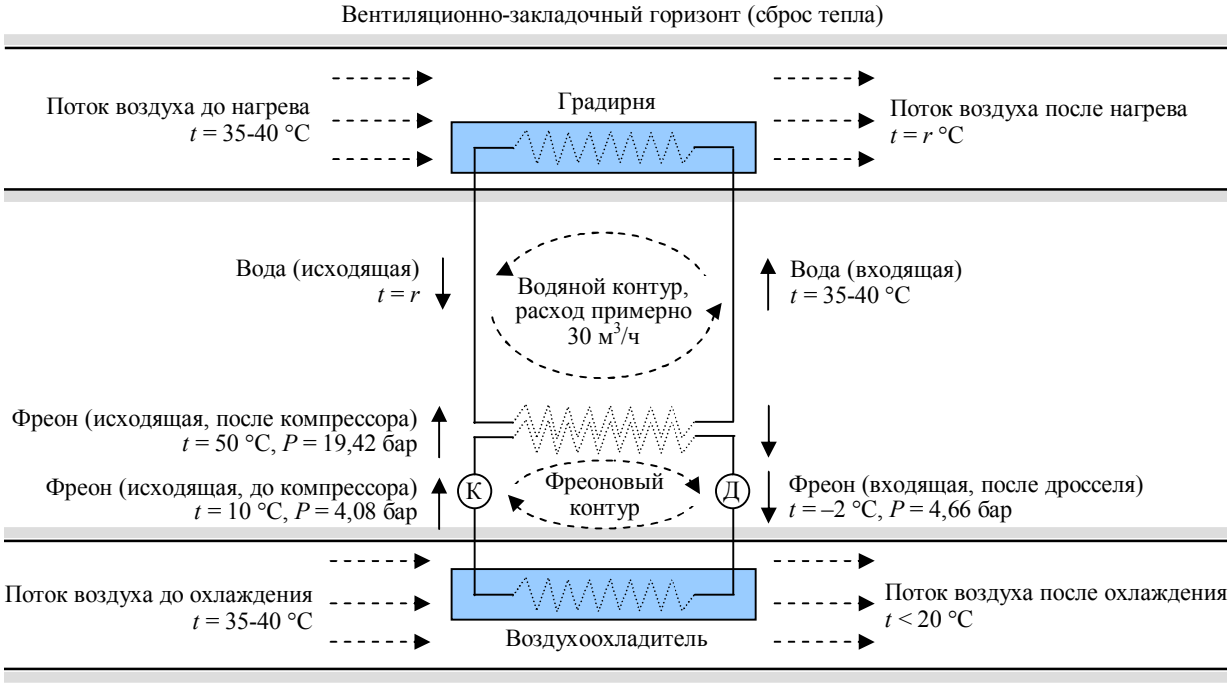



Рис.9. Схема системы охлаждения рудничного воздуха

**DOI:** 10.18454/PMI.2017.1.116

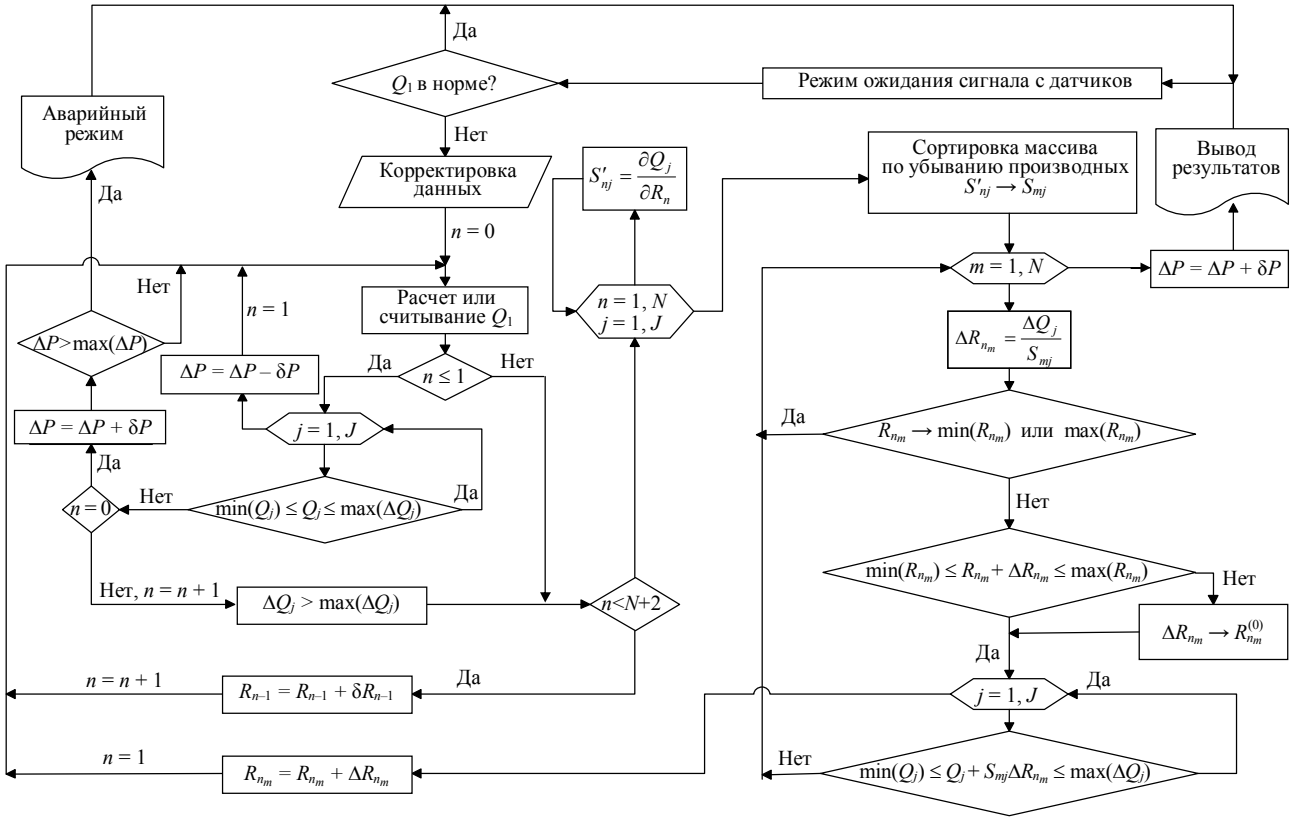



Рис.10. Блок-схема алгоритма оптимизации проветривания системой отрицательного регулирования с минимизацией нагрузки на ГВУ

5. Развитие энергосберегающих технологий проветривания обусловлено необходимостью обеспечения каждого участка рудника определенным количеством свежего воздуха с минимальными затратами энергии.

Для этих целей разработан алгоритм оптимального регулирования воздухораспределения средствами отрицательного регулирования с минимизацией нагрузки на главный вентилятор [8].

Алгоритм реализован численно на базе метода контурных расходов и позволяет в автоматическом режиме находить оптимальные решения при заданных параметрах вентиляционной сети, может использоваться для целей проектирования вентиляции (рис.10).

При отсутствии достаточного количества данных о параметрах вентиляционной сети информация считывается с датчиков, и работа приведенного алгоритма оказывается крайне медленной из-за большого количества операций [16]. В этом случае управление проветриванием в реальном времени осуществляется на основе упрощенного алгоритма с возможностью редактирования его в сложных ситуациях.

Подбор оптимальных параметров производится для ГВУ регулированием частоты вращения рабочего колеса $n_j$, для вентиляционных сооружений регулированием площади поперечного сечения вентиляционных окон $S_k$;

$$\begin{cases} \Delta n_j = A\left(\dfrac{\sum\limits_{j=1}^{N_{\text{ГВУ}}} n_j^2}{N_{\text{ГВУ}} n_j^2} I_{ij(\text{деф})} \max \Delta Q_i^+ - \dfrac{N_{\text{ГВУ}} n_j^2}{\sum\limits_{j=1}^{N_{\text{ГВУ}}} n_j^2} I_{ij(\text{зап})} \min \Delta Q_i^-\right) - C \min \Delta S_i; \\ \Delta S_k = B\left(\dfrac{\sum\limits_{k=1}^{N_{\text{COP}}} R_k Q_k^2}{N_{\text{COP}} R_k Q_k^2} I_{ik(\text{деф})} \max \Delta Q_i^+ - \dfrac{N_{\text{COP}} R_k Q_k^2}{\sum\limits_{k=1}^{N_{\text{COP}}} R_k Q_k^2} I_{ik(\text{зап})} \min \Delta Q_i^-\right), \end{cases}$$

где $A$, $B$, $C$ – эмпирические параметры регулирования; $n_j$ – частота вращения рабочего колеса $j$-й главной вентиляторной установки; $R_k$ – аэродинамическое сопротивление $k$-го средства отрица-

тельного регулирования; $Q_k$ – расход воздуха, проходящего через $k$-е вентиляционное сооружение; $N_{\text{ГВУ (СОР)}}$ – количество главных вентиляторных установок (средств отрицательного регулирования); $I_{ij(ik)}$ – матрица влияния, характеризующая влияние производительности $j$-й ГВУ ($k$-го вентиляционного сооружения) на величину расхода воздуха в каждой $i$-й выработке; $\Delta Q_i$ – ошибка управления расходами (отклонение фактических расходов от требуемых).

**Заключение.** Научная деятельность авторов не ограничивается перечисленными в статье направлениями, соответствующими специализации отдела аэрологии и теплофизики Горного института. В последние годы активно развиваются направления исследований в смежных областях наук, не имеющих непосредственного отношения к рудничной аэрологии. К ним относятся моделирование рудопотоков с целью оптимизации конвейерной транспортировки руды и исследования свойств ледопородных ограждений, используемых при проходке стволов.

Представленные модели аэрологических процессов совершенствуются и реализуются численно в аналитическом комплексе «АэроСеть», предназначенном для практического использования применительно к развитию и внедрению на горно-добывающих предприятиях энергосберегающих технологий обеспечения комфортных микроклиматических условий.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Автоматизированная обработка данных воздушно-депрессионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников / Б.П.Казаков, А.Г.Исаевич, С.В.Мальцев, М.А.Семин // Известия вузов. Горный журнал. 2016. № 1. С. 22-30.

2. Вентиляторные эжеторные установки для рудников / Н.И.Алыменко, Д.Н.Алыменко, А.И.Коровин, С.В.Пшеничников// Горный журнал. 2013. № 6. С. 73-77.

3. *Зайцев А.В.* Ресурсосберегающие решения в системах кондиционирования рудничного воздуха / А.В.Зайцев, Ю.А.Клюкин // Проблемы недропользования. 2015. № 2 (5). С. 26-31.

4. *Казаков Б.П.* Особенности моделирования процесса эжектирования воздуха на базе законов сохранения энергии и количества движения выработок / Б.П.Казаков, А.В.Шалимов // Известия вузов. Горный журнал. 2006. № 2. С. 68-72.

5. *Казаков Б.П.* Сравнительный анализ методов расчета воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях / Б.П.Казаков, А.В.Шалимов // Горное эхо. Вестник Горного института УрО РАН. 2009. № 1. С. 17-20.

6. *Казаков Б.П.* Влияние процессов испарения и конденсации влаги на тепловой режим глубоких рудников / Б.П.Казаков, А.В.Шалимов, А.В.Зайцев // Горный журнал. 2016. № 3. С. 73-76.

7. *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. 92-100.

8. *Казаков Б.П.* К вопросу энергосбережения проветривания рудников / Б.П.Казаков, А.В.Шалимов, А.С.Киряков // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 3. С. 139-147.

9. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания / Б.П.Казаков, А.В.Шалимов, М.А.Семин, Е.Л.Гришин, Н.А.Трушкова // Горный журнал. 2014. № 12. С. 105-109.

10. *Круглов Ю.В.* Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников / Ю.В.Круглов, Л.Ю.Левин, А.В.Зайцев // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2011. № 5. С. 100-108.

11. *Левин Л.Ю.* Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения / Л.Ю.Левин, М.А.Семин, Р.Р.Газизуллин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2014. № 9. С. 200-205.

12. *Левин Л.Ю.* Аэрологическая безопасность горных предприятий / Л.Ю.Левин, Д.С.Кормщиков // Инженерная защита. 2016. № 1 (12). С. 48-53.

13. *Левин Л.Ю.* Исследование динамики пылевоздушной смеси при проветривании тупиковой выработки в процессе работы комбайновых комплексов / Л.Ю.Левин, А.Г.Исаевич, М.А.Семин, Р.Р.Газизуллин // Горный журнал. 2015. № 1. С. 72-75.

14. *Медведев И.И.* Некоторые вопросы моделирования вентилятора-эжектора / И.И.Медведев, Н.Н.Мохирев // Известия вузов. Горный журнал. 1971. № 6. С. 70-74.

15. *Мохирев Н.Н.* Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация / Н.Н.Мохирев, В.В.Радько. М.: Недра, 2007. 324 с.

16. Применение системы автоматического оптимального управления проветриванием в Березовском руднике ОАО «Беларуськалий» / Ю.В.Круглов, Л.Ю.Левин, А.С.Киряков, С.В.Бутаков, Р.И.Шагбутдинов // Горный журнал. 2013. № 6. С. 61-64.

17. *Шалимов А.В.* Учет инерционных сил движения воздуха при расчетах нестационарного воздухораспределения в вентиляционной сети / А.В.Шалимов, А.В.Зайцев, Е.Л.Гришин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 4. С. 218-222.

18. *Kazakov B.P.* Stability of natural ventilation mode after main fan stoppage / B.P.Kazakov, A.V.Shalimov, M.A.Semin // International Journal Heat Mass Transfer. 2015. № 86. P. 288-293.

***Авторы*: Б.П.Казаков,** *д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, aero_kaz@mail.ru* (*Горный институт ГИ УрО РАН, Пермь, Россия*), **Л.Ю.Левин,** *д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом, aerolog_lev@mail.ru* (*Горный институт ГИ УрО РАН, Пермь, Россия*), **А.В.Шалимов,** *д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, shalimovav@mail.ru* (*Горный институт ГИ УрО РАН, Пермь, Россия*), **А.В.Зайцев,** *канд. техн. наук, заведующий сектором, aerolog.artem@gmail.com* (*Горный институт ГИ УрО РАН, Пермь, Россия*).

*Статья принята к публикации 9.11.2016.*