

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

DOI: 10.15593/2224-9923/2014.11.12

УДК 622.4

© Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Киряков А.С., 2014

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ СИСТЕМ ЧАСТИЧНОГО ПОВТОРНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗДУХА

А.В. Зайцев, Ю.А. Клюкин, А.С. Киряков

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук,
Пермь, Россия

Представлены основные негативные последствия, связанные с выпадением влаги в воздухоподводящих выработках шахт и рудников в теплые периоды времени. Приведены основные данные по ущербу, связанному с возникновением конденсационных рассолов в выработках калийных рудников. Предложен способ осушения воздухоподводящих выработок за счет применения систем частичного повторного использования воздуха.

Предметом исследования являются тепло- и массообменные процессы в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха. В результате разработана модель преобразований термодинамических параметров рудничного воздуха при использовании рециркуляционного проветривания с учетом процессов теплообмена между рудничным воздухом и горным массивом на базе модели, использующей коэффициент нестационарного теплообмена. На основании полученных результатов разработана методика расчета термовлажностных параметров рудничного воздуха в рециркуляционных контурах вентиляционной сети при применении систем частичного повторного использования воздуха. С помощью I-d диаграмм проанализированы термодинамические процессы, протекающие в рудничной атмосфере горных выработок на участке рециркуляционных контуров при наличии либо отсутствии процессов сорбции влаги горным массивом. Получены выражения для определения скорости выпадения влаги в воздухоподводящих выработках рудника и расстояния начала процесса выпадения влаги. Выявлены факторы, определяющие эффективность использования рециркуляционного проветривания для осушения транспортных выработок калийных рудников. Определено, что эффективность рециркуляционного проветривания зависит, помимо аэродинамических особенностей, от особенностей сорбционного влагообмена между рудничным воздухом и горным массивом на всех участках рециркуляционных контуров.

Ключевые слова: рудник, горная выработка, рециркуляция, нестационарный теплообмен, сорбция, конденсация, влагосодержание, I-d диаграмма, объемный расход, критическая влажность, гигроскопичность.

RESEARCH IN THE PROCESS OF HEAT AND MASS EXCHANGE IN MINE OPENINGS USING THE SYSTEMS OF PARTIAL AIR REUSE

A.V. Zaitsev, Iu.A. Kliukin, A.S. Kiriakov

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russian Federation

Main negative consequences of moisture precipitation at the air intake openings of mines during the warm periods are discussed. General data on the damage inflicted by condensate brines in the openings of potash mines are presented. The work suggests a technique of air intake openings dewatering by the systems of partial air reuse.

The subject of the research is heat and mass exchange processes in rock openings while applying the systems of partial air reuse. As a result, a model is designed of transformation of the mine air's thermodynamic parameters during recirculation ventilation, taking account of heat exchange between the mine air and the massif, on the basis of a model with non-stationary heat transfer coefficient. Using the data obtained, a technique of evaluating thermal and humidity parameters of mine air in recirculation contours of ventilation network using partial air reuse was developed.

With the help of I-d diagrams thermodynamic processes in the mine openings environment at recirculation contours are analysed both with and without moisture occlusion by the massif. Equations are generated to determine moisture precipitation rate in the air intake openings and distance of the initial moisture precipitation. The factors conditioning effectiveness of recirculation ventilation to dewater transport openings of potash mines are revealed. It is found that effectiveness of recirculation ventilation depends on, besides aerodynamical features, occlusive moisture exchange between mine air and the massif in all parts of recirculation contours.

Keywords: mine, mine opening, recirculation, non-stationary heat transfer, occlusion, condensation, moisture content, I-d diagram, volume flow rate, critical humidity, hygroscopticity.

Введение

Выпадение влаги в рудниках на главных воздухоподающих выработках в теплый период года влечет за собой целый ряд нежелательных последствий, среди которых можно выделить:

- выпадение и накопление конденсационных рассолов в транспортных выработках;

- нарушение систем автоматики и энергоснабжения;

- коррозию и аварийность оборудования и транспорта [1–3].

Следует подчеркнуть, что в условиях калийных рудников указанные явления имеют особое значение, поскольку при этом в воздушной среде и на почве горных выработок образуются агрессивные компоненты, которые наносят значительный ущерб на всех участках рудника [4, 5].

Наиболее наглядно указанный ущерб можно проследить при рассмотрении нарушения электроснабжения рудника, простоев транспорта и технологического оборудования. Ущерб, связанный с выходом из строя средств автоматики и нарушением электроснабжения рудника, заключается прежде всего в простоях отдельных участков или панелей при тех или иных отключениях электроэнергии. Расчет ущерба от выхода из строя средств автоматики, нарушения электроснабжения рудника, простоев технологического оборудования и транспорта проводился на основе статистической обработки данных дежурных диспетчеров калийных рудников в течение нескольких лет. Полученные численные данные указывают на резкое возрастание числа отключений энергии и простоев оборудования в период с мая по октябрь каждого года. В частности, результаты многолетних статистических исследований на калийных рудниках показывают, что выпадение влаги в теплый период времени приводит к увеличению в два раза количества простоев технологического оборудования и в 1,89 раза – простоев

самоходного транспорта на руднике [1]. Количественное определение экономических убытков затруднительно по причине отсутствия для этого методической базы. Однако и при отсутствии расчетов ясно, что дополнительные простои горного производства и выход из строя дорогостоящего горного оборудования влекут за собой значительные материальные убытки.

Применение систем повторного использования воздуха для нормализации микроклиматических параметров рудничной атмосферы отмечено давно [1, 2, 6, 7]. Однако до сегодняшнего дня решение теоретических, методических и технических вопросов рециркуляционного проветривания рудников имело концептуальную направленность на ресурсосбережение [8, 9]. Детальных исследований, посвященных рециркуляционному проветриванию как средству управления термодинамическими параметрами рудничной атмосферы и горного массива, не проводилось.

Для исследования эффективности использования рециркуляционного проветривания для осушения рудничного воздуха и почвы воздухоподающих выработок необходима разработка методик расчета термовлажностных параметров воздуха в рециркуляционных контурах. В расчетах необходим учет тепломассообменных процессов между рудничным воздухом и горным массивом [3, 10, 11].

Разработка модели переноса тепла и влаги в рудничной атмосфере в рециркуляционном контуре

Для решения задачи требуется знание функциональных зависимостей между термодинамическими параметрами рудничного воздуха на различных участках рециркуляционного контура.

Теоретически задача формулируется следующим образом. Имеется расчетная схема, изображенная на рис. 1, которая представляет собой простейший рециркуляционный контур.

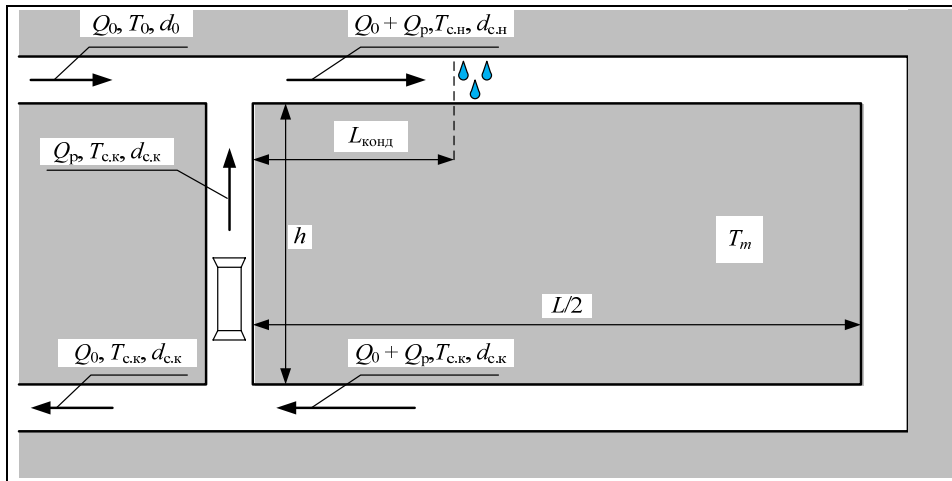


Рис. 1. Расчетная схема исследования тепломассообменных процессов в рециркуляционном контуре: Q_0 – расход воздуха; T_0 – температура воздуха; d_0 – влагосодержание в воздухе; индекс «0» соответствует характеристикам свежего воздуха, поступающего на проветривание участка; Q_p – количество воздуха, поступающего на повторное проветривание; индекс «с.н» соответствует смеси в начале контура; индекс «с.к» – смеси в конце контура; $L_{\text{конд}}$ – расстояние от начала контура до места выпадения конденсата по направлению движения воздуха; T_m – температура массива; h – длина рециркуляционной сбойки; L – длина рециркуляционного контура

Исходными данными являются расход Q_0 , температура T_0 и влагосодержание d_0 струи, подводимой к рециркуляционному контуру, а также коэффициент рециркуляции k_p . Длина рециркуляционного контура L принимается равной суммарной длине воздухоподающих и вентиляционных выработок, длиной рециркуляционной сбойки пренебрегают. Помимо этого, известными принимаются все теплофизические и геометрические параметры, определяющие теплообмен между воздухом и массивом.

Задача решается следующим образом. В рециркуляционном контуре выделяются две характерные точки – точка в начале контура, после смешения свежего и рециркуляционного воздуха (точка смеси в начале контура – параметры имеют индексы с.н), и точка в конце контура, непосредственно перед местом сопряжения исходящей струи с рециркуляционной сбойкой (точка смеси в конце контура – параметры имеют индексы с.к).

Рассмотрим некоторый объем воздуха, совершающий рециркуляционное дви-

жение в контуре. Будем нумеровать обороты, совершенные им, индексом i . Тогда температура смеси в точке начала контура на $(i + 1)$ -м обороте выражается через температуру свежей струи, температуру в точке конца контура на i -м обороте и коэффициент рециркуляции следующим образом:

$$T_{\text{с.н}}^{i+1} = (1 - k_p) \cdot T_0 + k_p \cdot T_{\text{с.к}}^i. \quad (1)$$

Температуры смеси в точках начала и конца контура связаны между собой зависимостью, определяемой наличием источников выделения или поглощения тепла, а также процессом теплообмена. Вид этой зависимости устанавливается при помощи уравнения теплового баланса для элементарного участка воздуха [12, 13]:

$$\Delta Q_{\text{с.н}}^i = -j_{\text{с.н}}^i \Delta S \Delta t + WS \Delta x \Delta t, \quad (2)$$

где $\Delta Q_{\text{с.н}}^i$ – убыль количества теплоты единицы массы воздуха, заключенной в объеме $S \Delta x$ на i -м обороте воздуха;

$J_{c.n}^i$ – тепловой поток от воздуха к массиву; ΔS – площадь теплообмена воздуха с массивом на участке длиной Δx , определяется как произведение периметра на длину: $P\Delta x$; Δt – время движения воздуха по участку длиной Δx ; W – мощность источников тепловыделения в рециркуляционном контуре. Расписывая выражение (2), получим

$$c\Delta T_c^i S\Delta x = -k_\tau(T_{c.n}^i - T_m)P\Delta x \frac{\Delta x}{v} + W \frac{S\Delta x\Delta x}{v}, \quad (3)$$

где k_τ – коэффициент нестационарного теплообмена, Вт/м²; T_m – температура поверхности массива, °С; v – скорость движения воздуха в рециркуляционном контуре, м/с.

Переходя в уравнении (3) от конечных разностей к дифференциальной форме, получим линейное неоднородное дифференциальное уравнение в виде

$$\frac{dT_c^i(x)}{dx} = -(T_{c.n}^i - T_m) \frac{k_\tau P}{cSv} + \frac{W}{cSv}. \quad (4)$$

Поскольку влияние источников тепла на температуру воздуха исходящей струи незначительно, положим W равным нулю. Тогда решение уравнения (4) имеет следующий вид [12]:

$$T_c^i(x) = T_m + (T_{c.n}^i - T_m) e^{-\frac{k_\tau Px}{cSv}}. \quad (5)$$

Поскольку в конце рециркуляционного контура выполняется условие $T_{c.к}^i = T_c^i(L)$, то связь между температурой в конце и начале рециркуляционного контура имеет вид

$$T_{c.к}^i = T_m + (T_{c.н}^i - T_m) e^{-\frac{k_\tau PL}{cSv}}. \quad (6)$$

Подставляя полученное выражение в формулу (1), получим следующую рекуррентную формулу для вычисления температуры смеси в начале контура на

обороте $i + 1$ через температуру на i -м обороте:

$$T_{c.н}^{i+1} = (1 - k_p) \cdot T_0 + k_p \cdot \left(T_m - (T_{c.н}^i + T_m) e^{-\frac{k_\tau PL}{cSv}} \right). \quad (7)$$

Введем следующие обозначения:

$$A = (1 - k_p) \cdot T_0 + k_p \left(1 - e^{-\frac{k_\tau PL}{cSv}} \right) T_m, \\ B = k_p \cdot e^{-\frac{k_\tau PL}{cSv}}. \quad (8)$$

Рекуррентное выражение (7) может быть записано в следующем виде:

$$T_{c.н}^{i+1} = A + B \cdot T_{c.н}^i. \quad (9)$$

Принимая значения для $i = 0$, $T_{c.н}^0 = T_0$ и применяя метод математической индукции, получим следующее выражение для температуры смеси в начале рециркуляционного контура на i -м обороте:

$$T_{c.н}^N = A \sum_{i=0}^{N-1} B^i + B^N \cdot T_0. \quad (10)$$

Сумма степенного ряда в первом слагаемом правой части есть геометрическая прогрессия, которую можно вычислить аналитически. Окончательно, подставляя выражение (8), получаем

$$T_{c.н}^N = \frac{A(1 - B^{N+1})}{1 - B} + B^N \cdot T_0. \quad (11)$$

Учитывая быструю сходимость геометрической прогрессии или физически эквивалентное приближение о быстром выравнивании термодинамических параметров в рециркуляционном контуре, можно рассчитать предел выражения (11) и тем самым вычислить установившиеся температуры смесей воздуха в начале и конце рециркуляционного контура:

$$T_{c.н} = \frac{(1 - k_p) \cdot T_0 + k_p \left(1 - e^{-\frac{k_\tau PL}{cSv}} \right) T_m}{1 - k_p \cdot e^{-\frac{k_\tau PL}{cSv}}},$$

$$T_{c,к} = \frac{(1-k_p) \cdot T_0 + \left(1 - e^{-\frac{k_{\tau} PL}{cSv}}\right) T_m}{1 - k_p \cdot e^{-\frac{k_{\tau} PL}{cSv}}}. \quad (12)$$

Распределение температуры внутри рециркуляционного контура определяется выражением (5).

При известном распределении температур возможно определение влагосодержания воздуха. Однако применение для этого рассуждений, подобных проведенным выше, невозможно, поскольку функция изменения влагосодержания воздуха при движении его по рециркуляционному контуру имеет излом в точке пересечения кривых постоянного начального влагосодержания и критической относительной влажности.

Термодинамические параметры воздуха могут определяться при помощи I-d диаграммы, но целесообразно использование функциональной зависимости [14–16]. Функциональная зависимость определяется на основании формулы для определения влагосодержания d , кг/кг, влажного воздуха:

$$d = \frac{0,063 \cdot p_n}{p_{бар} - p_n}, \quad (13)$$

где p_n – давление пара в воздухе, Па; $p_{бар}$ – абсолютное (барометрические) давление воздуха и пара, Па.

Относительная влажность воздуха, %, определяется как отношение парциального давления пара к давлению насыщенного пара при данной температуре:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{н.п}} \cdot 100, \quad (14)$$

где $p_{н.п}$ – давление насыщенного пара, Па.

Подстановка выражения (14) в выражение (13) приводит к следующей формуле:

$$d = \frac{0,063 \cdot \varphi}{0,01 \cdot \frac{p_{бар}}{p_{н.п}} - \varphi}. \quad (15)$$

Исследованиями установлено, что давление насыщенного пара зависит только от температуры, вид зависимости хорошо аппроксимируется следующей формулой:

$$p_{н.п} = 479 + (11,52 + 1,62 \cdot T)^2. \quad (16)$$

Объединение выражений (15) и (16) дает функциональную зависимость между абсолютным давлением влажного воздуха, его температурой, относительной влажностью и влагосодержанием:

$$d = \frac{0,063 \cdot \varphi}{\frac{0,01 \cdot p_{бар}}{479 + (11,52 + 1,62 \cdot T)^2} - \varphi}. \quad (17)$$

Причем представленные физические переменные имеют следующие области определения:

$$\begin{aligned} 0 < d < +\infty, \\ -273 < T < +\infty \\ 0 < p_{бар} < +\infty \\ 0 < \varphi < 100. \end{aligned} \quad (18)$$

Методика расчета термовлажностных параметров рудничного воздуха при применении систем частичного повторного использования воздуха

Процессы, происходящие с влажным воздухом при его движении по рециркуляционному контуру, качественно могут быть описаны следующим образом. В точке начала контура происходит смешение воздуха с различными термовлажностными параметрами. Смесь свежего и рециркуляционного воздуха, перемещаясь по длине контура, охлаждается. При этом процесс охлаждения сначала идет по линии постоянного влагосодержания, а при достижении относительной влажности предельного максимального значения дальнейшее охлаждение идет по линии критической относительной влажности. Последний процесс сопровождается выпадением влаги до тех пор, пока температура смеси не достигнет температуры в конце рециркуляционного контура. Если

не учитывать процессы сорбции, то конечная температура и влагосодержание в дальнейшем изменении не претерпевают.

Алгоритм определения распределения температуры и влажности в рециркуляционном контуре при помощи проведенных исследований и I-d диаграммы можно представить в следующем виде (рис. 2):

1. Определяется среднее абсолютное давление в рециркуляционном контуре $p_{бар}$. По известному среднему абсолютному давлению определяется конкретный вид I-d диаграммы либо используется аналитическая формула (17).

2. По известной температуре T_0 и влагосодержанию d_0 свежей струи определяется точка O на I-d диаграмме (см. рис. 2).

3. На основании принятого коэффициента рециркуляции и известных параметров рециркуляционного контура по формулам (12) определяются температуры смеси в начале и конце рециркуляционного контура.

4. На I-d диаграмме выделяется линия изменения термовлажностных параметров воздуха, состоящая из вертикальной линии постоянного влагосодержания и кривой критической относительной влажности воздуха (см. рис. 2, выделена жирным).

5. Находится точка пересечения линии изменения параметров с прямой темпера-

туры $T = T_{с.к}$ – термовлажностные параметры смеси в конце рециркуляционного контура. Тем самым определяется точка O . При использовании аналитической зависимости (12) в выражение подставляются значения $\phi = \phi_{кр}$ и $T = T_{с.к}$. После чего решается задача определения d из полученного уравнения.

6. Соединив точки O и K прямой и найдя точку пересечения этой прямой с прямой температуры $T = T_{с.н}$ – точку H , определяют термовлажностные параметры смеси воздуха в начале рециркуляционного контура.

После определения термовлажностных параметров смеси воздуха возможно определение скорости выпадения влаги в горных выработках контура и точки начала ее выпадения.

Скорость выпадения влаги в горной выработке зависит от расхода воздуха в ней и изменения влагосодержания:

$$\frac{dm}{dt} = \Delta d \cdot \rho \cdot Q. \quad (19)$$

Расстояние начала выпадения влаги от места сопряжения выработки с рециркуляционной сбойкой определяется при помощи выражения (5), считая разность температур ΔT считается известной:

$$L_{конд} = -\frac{cQ}{k_c P} \ln \left(1 - \frac{\Delta T}{T_{с.н} - T_m} \right). \quad (20)$$

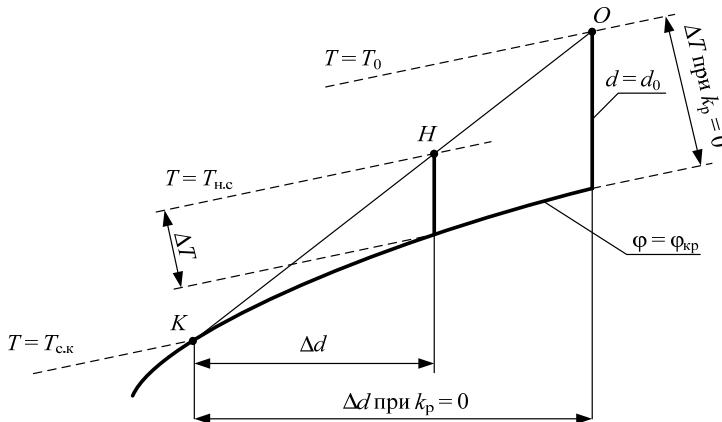


Рис. 2. I-d диаграмма изменения термодинамических параметров воздуха при его движении по рециркуляционному контуру без учета сорбции

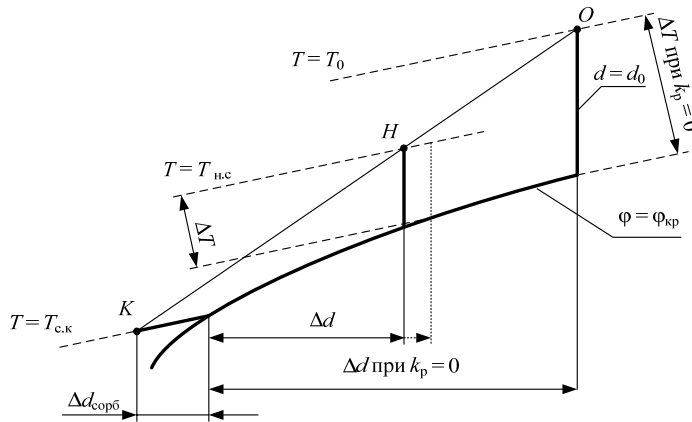


Рис. 3. I-d диаграмма изменения термодинамических параметров воздуха при его движении по рециркуляционному контуру с учетом сорбции

Как показывает анализ, уменьшение влагосодержания в воздухе после его смешения с рециркуляционным воздухом компенсируется увеличением расхода воздуха в контуре, поэтому эффект использования рециркуляционного проветривания для осушения выработок рудника отсутствует.

В действительности учет сорбции необходим, поскольку согласно используемым схемам проветривания в рециркуляционном проветривании участвуют значительные объемы подземных горных выработок. Следовательно, при прохождении воздуха по горным выработкам происходит влагообмен между воздухом и горным массивом, обуславливающий дополнительное уменьшение влагосодержания воздуха. Исходя из этого для определения термовлажностных параметров воздуха в точке конца контура необходимо использовать процессы на I-d диаграмме в следующем виде (рис. 3).

В отличие от предыдущего случая при движении по линии максимальной влажности воздуха и достижении смеси воздуха температуры, равной температуре $T_{c,k}$, учет сорбции приведет к дальнейшему уменьшению влагосодержания воздуха по линии $T = T_{c,k}$ на величину $\Delta d_{сорб}$.

Для определения величины $\Delta d_{сорб}$ необходимо либо использование экспериментальных данных, либо моделирование сопряженной задачи влагообмена между влажным рудничным воздухом и горным массивом.

Заключение

В ходе исследований рассмотрены процессы тепломассопереноса при применении систем частичного повторного использования воздуха.

На основании полученных результатов разработана методика определения термовлажностных параметров рудничного воздуха при наличии рециркуляционного проветривания.

Выявлено, что эффективность рециркуляционного проветривания зависит, помимо аэродинамических особенностей, от сорбционных свойств участков горного массива в рециркуляционных контурах.

Полученные результаты позволили разработать мероприятия по осушению главных транспортных выработок калийных рудников предприятий ОАО «Уралкалий» и ОАО «Беларуськалий» [11].

Список литературы

1. Казаков Б.П. Ресурсосберегающие технологии управления климатическими параметрами рудников: дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2001. – 315 с.
2. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: Изд-во УрО АН СССР, 1990. – 252 с.
3. Казаков Б.П., Зайцев А.В., Трушкова Н.А. Применение частичного повторного использования воздуха для снижения выпадающей влаги в калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С. 126–130.
4. Медведев И.И. Проветривание калийных рудников. – М.: Недра, 1970. – 207 с.
5. Максимович Г.А., Бельтюков Г.В. Формирование и миграция конденсационных рассолов в горных выработках калийных рудников // Геология и гидрогеология соляных месторождений: сб. – Л., 1972. – 262 с.
6. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation // Transaction of the Inst. Of Mining Engineers. – 1933. – Vol. 90. – May. – P. 63–68.
7. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years // The Mining Eng. – 1982. – Vol. 141, № 244. – P. 401–413.
8. Исаевич А.Г. Повторное использование воздуха при проветривании калийных рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сессии Горн. ин-та УрО РАН по результатам НИР в 2005 году, 6–13 апреля 2006. – Пермь, 2006. – С. 232–235.
9. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2007. – 324 с.
10. Kazakov B.P., Shalimov A.V. The connected task of non-stationary heat exchange between mine air and mining massif // Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress. – Poland, 2001. – P. 63–68.
11. McPherson M.J., Robinson G. Barometric survey of shafts at Baulby Mine, Cleveland Potash // Journal of Mine Ventilation Society of South Africa. – 1980. – Vol. 33, № 9. – P. 145–164.
12. Воропаев А.Ф. Теория теплообмена рудничного воздуха и горных пород в глубоких шахтах. – М., 1966. – 252 с.
13. Енохович А.С. Краткий справочник по физике. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1976. – 288 с.
14. Отопление и вентиляция: учебник для вузов: в 2 ч. Ч. 2. Вентиляция / под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1976. – 439 с.
15. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. – СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005. – 400 с.
16. Hall A.E., Gangal M.K., Stewart S.B. Atmospheric fog in Canadian mines // CIM Bulletin. – 1988. – Vol. 921. – P. 48–54.

References

1. Kazakov B.P. Resursosberegaiushchie tekhnologii upravleniia klimaticheskimi parametrami rudnikov [Resource-saving technologies of climatic mine parameters management]. Thesis of doctor's degree dissertation. Perm', 2001. 315 p.
2. Medvedev I.I., Krasnoshtein A.E. Aerologiya kaliinykh rudnikov [Aerology of potassium mines]. Sverdlovsk: Ural'skoe otdelenie Akademii nauk SSSR, 1990. 252 p.
3. Kazakov B.P., Zaitsev A.V., Trushkova N.A. Primenenie chastichnogo povtornogo ispol'zovaniia vozdukhа dlia snizheniia vypadaushchei vlаgi v kaliinykh rudnikakh [Partial air reuse for condensed moisture reduction in potassium mines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 3, pp. 126–130.
4. Medvedev I.I. Provetrivanie kaliinykh rudnikov [Potassium mines ventilation]. Moscow: Nedra, 1970. 207 p.
5. Maksimovich G.A., Bel'tiukov G.V. Formirovanie i migratsiia kondensatsionnykh rassolov v gornyykh vyrabotkakh kaliinykh rudnikov [Formation and migration of condensation brines in workings of potassium mines]. *Sbornik "Geologiya i gidrogeologiya solianyykh mestorozhdenii"*. Leningrad, 1972. 262 p.
6. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation. *Transaction of the Inst. Of Mining Engineers*, 1933, vol. 90, May, pp. 63–68.
7. Morris I.N., Walker G. Changes in the approach to ventilation in recent years. *The Mining Eng.*, 1982, vol. 141, no. 244, pp. 401–413.

8. Isaevich A.G. Povtornoie ispol'zovanie vozdukhа pri provetrvanii kaliinykh rudnikov [Air reuse in potassium mines ventilation]. *Materialy ezhegodnoi nauchnoi sessii "Strategiia i protsessy osvoeniia georesursov"*. Gornyi institut UrO RAN. Perm', 2006, pp. 232–235.

9. Mokhiev N.N., Rad'ko V.V. Inzhenernye raschety ventilatsii shakht. Stroitel'stvo. Rekonstruktsiia. Eksploatatsiia [Engineering analysis of mine ventilation. Construction. Reconstruction. Operation]. Moscow: Nedra-Biznestsentr, 2007. 324 p.

10. Kazakov B.P., Shalimov A.V. The connected task of non-stationary heat exchange between mine air and mining massif. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*. Poland, 2001.

11. McPherson M.J., Robinson G. Barometric survey of shafts at Baulby Mine, Cleveland Potash. *Journal of Mine Ventilation Society of South Africa*, 1980, vol. 33, no. 9, pp. 145–164.

12. Voropaev A.F. Teoriia teploobmena rudnichnogo vozdukhа i gornyykh porod v glubokikh shakhtakh [Theory of heat exchange of mine air and rocks in deep mines]. Moscow, 1966. 252 p.

13. Enkhovich A.S. Kratkii spravochnik po fizike [The physics quick reference guide]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1976. 288 p.

14. Otoplenie i ventilatsiia. Chast' 2. Ventilatsiia [Heating and ventilation. Part 2. Ventilation]. Ed. By V.N. Bogoslovskii. Moscow: Stroiizdat, 1976. 439 p.

15. Stefanov E.V. Ventilatsiia i konditsionirovanie vozdukhа [Ventilation and air conditioning]. Saint Petersburg: AVOK Severo-Zapad, 2005. 400 p.

16. Hall A.E., Gangal M.K., Stewart S.B. Atmospheric fog in Canadian mines. *CIM Bulletin*, 1988, vol. 921.

Об авторах

Зайцев Артем Вячеславович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, научный сотрудник Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Клюкин Юрий Андреевич (Пермь, Россия) – инженер Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: aero_yuri@mail.ru).

Киряков Артем Сергеевич (Пермь, Россия) – ведущий инженер Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а; e-mail: aero_artem@mail.ru).

About the authors

Artem V. Zaitsev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Researcher, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, Sibirskaiia st., 78a; e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Iurii A. Kliukin (Perm, Russian Federation) – Engineer, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, Sibirskaiia st., 78a; e-mail: aero_yuri@mail.ru).

Artem S. Kiriakov (Perm, Russian Federation) – Senior Engineer, Institute of Mining, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, Sibirskaiia st., 78a; e-mail: aero_artem@mail.ru).

Получено 3.04.2014

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Зайцев А.В., Клюкин Ю.А., Киряков А.С. Исследование процессов тепломассопереноса в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 121–129.

Please cite this article in English as:

Zaitsev A.V., Kliukin Iu.A., Kiriakov A.S. Research in the process of heat and mass exchange in mine openings using the systems of partial air reuse. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2014, no. 11, pp. 121–129.