

УДК 622.4

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2022

Осушение горных выработок калийных рудников с использованием средств систем автоматического управления проветриванием**А.В. Зайцев, К.М. Агеева**

Горный институт УрО РАН (Россия, 614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78а)

Drying of Potassium Mine Workings Using Automatic Air Control Systems**Artem V. Zaitsev, Ksenya M. Ageeva**

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (78a Sibirskaya st., Perm, 614007, Russian Federation)

Получена / Received: 29.07.2021. Принята / Accepted: 19.11.2021. Опубликовано / Published: 31.01.2022

Ключевые слова:

горная выработка, рудничная вентиляция, тепловой режим, микроклимат горных выработок, воздухораспределение, осушение воздуха, расчет количества воздуха, системы автоматического управления проветриванием, вентиляция по требованию, рециркуляция, отрицательное регулирование.

В условиях калийных рудников известна проблема выпадения избыточной влаги из поступающего в шахту воздуха в теплый период времени года. Физически процесс связан с тем, что насыщенный влагой теплый воздух поступает в горные выработки и в процессе теплообмена с относительно холодными горными породами охлаждается. При охлаждении воздуха происходит повышение его относительной влажности вплоть до достижения точки росы. Дальнейшее охлаждение воздуха приводит к выпадению избыточной влаги при сохранении максимальной относительной влажности воздуха. Выпадение влаги совместно с соляными породами создает коррозионно-агрессивную среду, ухудшает устойчивость выработок и приводит к размыву почвы с вытекающими сложностями для проезда горных машин. Внедрение теплотехнических средств осушения воздуха является крайне затратным мероприятием. В то же время процессы теплообмена в горных выработках зависят от воздухораспределения, управление которым реализуется в современных системах автоматического управления проветриванием. В связи с этим в исследовании рассмотрен вариант применения средств систем автоматического управления проветриванием, наряду с их традиционным использованием, для целей осушения горных выработок. В работе показано, что количество конденсирующейся влаги определяется, прежде всего, расходом воздуха. Поэтому исключение избыточной подачи воздуха в рудник и по выработкам, реализуемое системами автоматического управления проветриванием, позволяет снизить выпадение влаги в горных выработках. Кроме того, перемещение систем рециркуляционного проветривания, входящих в состав систем автоматического управления проветриванием, максимально близко к стволам позволяет включить в рециркуляционный контур больший объем воздухоподающих выработок и камер служебного назначения, что также дает возможность производить их осушение в условиях гигроскопичных горных пород.

Keywords:

mine working, mine ventilation, thermal regime, microclimate of mine workings, air distribution, air dehumidification, calculation of air amount, automatic ventilation control systems, ventilation on demand, recirculation, negative regulation.

In the conditions of potash mines, the problem of excess moisture loss from the air entering the mine during the warm period of the year is known. Physically, the process is related to the fact that warm air saturated with moisture enters the mine workings and cools down in the process of heat exchange with relatively cold rocks. When the air is cooled, its relative humidity rises until it reaches the dew point. Further cooling of the air leads to the loss of excess moisture while maintaining the maximum relative humidity. Moisture precipitation together with salt rocks creates a corrosive-aggressive environment, worsens the stability of workings and leads to soil erosion with the ensuing difficulties for the passage of mining vehicles. The introduction of heat engineering means of air drying is an extremely costly undertaking. At the same time, heat and mass transfer processes in mine workings depend on air distribution, which is controlled by modern automatic ventilation control systems. In this regard, the study considers the option of using the means of automatic ventilation control systems, along with their traditional use, for the purpose of draining mine workings. The paper shows that the amount of condensing moisture is determined primarily by the air flow. Therefore, the elimination of excess air supply to the mine and workings, implemented by automatic ventilation control systems, makes it possible to reduce moisture loss in mine workings. In addition, moving the recirculation ventilation systems, which are part of the automatic ventilation control systems, as close as possible to the shafts allows you to include a larger volume of air supply workings and service chambers in the recirculation circuit, which also makes it possible to drain them in conditions of hygroscopic rocks.

Зайцев Артем Вячеславович – доктор технических наук, заведующий сектором отдела аэрологии и теплофизики (тел.: +007 (982) 487 34 12; e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Агеева Ксения Михайловна – инженер отдела аэрологии и теплофизики (тел.: +007 (950) 479 41 20, e-mail: kmageeva@gmail.com). Контактное лицо для переписки.

Artem V. Zaitsev (Author ID in Scopus: 57213120380) – Doctor in Engineering, Head of the Sector of the Department of Aerology and Thermal Physics (tel.: +007 (982) 487 34 12; e-mail: aerolog.artem@gmail.com).

Ksenya M. Ageeva – Engineer of the Department of Aerology and Thermal Physics (tel.: +007 (950) 479 41 20, e-mail: kmageeva@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Зайцев А.В., Агеева К.М. Осушение горных выработок калийных рудников с использованием средств систем автоматического управления проветриванием // Недропользование. – 2022. – Т.22, №1. – С.45–50. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.7

Please cite this article in English as:

Zaitsev A.V., Ageeva K.M. Drying of Potassium Mine Workings Using Automatic Air Control Systems. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.1, pp.45-50. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.7

Введение

Ведение горных работ на залежах полезных ископаемых относительно неглубоких (с глубиной ведения горных работ до 500 метров), географически расположенных в районах с характерным теплым климатом, влечет за собой проблему выпадения избыточного количества влаги в главных воздухоподающих выработках. Поскольку для указанного интервала глубин температура горных пород невысока (15–18 °С), в теплый период времени теплый и влажный воздух, поступающий в горные выработки, охлаждается, и в выработках конденсируется значительное количество влаги. Особенно остро проблема выпадения влаги стоит в регионах с теплым и влажным климатом.

Выпадение влаги в рудниках на главных воздухоподающих (транспортных) выработках влечет за собой целый ряд нежелательных последствий, среди которых можно выделить:

- 1) коррозию и аварийность оборудования и транспорта;
- 2) нарушение систем автоматики и энергоснабжения;
- 3) выпадение и накопление конденсационных рассолов в транспортных выработках создает трудности проезда автотранспорта, доставляющего горнорабочих до забоев.

При этом если пренебрежение распределением влажностных показателей допустимо на угольных шахтах, металлических и полиметаллических рудниках, то 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. Кроме того, насыщение влагой гигроскопичных горных пород, в особенности глинистых прослоек массива, снижает их физико-механические свойства и ведет к уменьшению устойчивости горных выработок и целиков, создает опасность ведения горных работ [1–3].

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 отключении 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 [4], что выпадение влаги в теплый период времени приводит к увеличению в два раза количества простоев технологического оборудования и в 1,89 раза – к увеличению простоев самоходного транспорта на руднике. Количественное определение экономических убытков затруднительно по причине отсутствия для этого методической базы. Однако и при отсутствии расчетов понятно, что дополнительные простои горного производства и выход из строя дорогостоящего горного оборудования влекут за собой значительные материальные убытки.

Проблемами осушения воздухоподающих горных выработок наиболее интенсивно занимались аэрологи и теплофизики калийных и каменносолевых рудников, среди которых можно выделить исследования И.И. Медведева, А.Е. Красноштейна [5], Б.П. Казакова [6], Н.Д. Лужецкой [7], Л.Ю. Левина [8] и других [9, 10].

Осушение воздуха, поступающего в горные выработки, как средство нормализации микроклиматических параметров в рабочих зонах рассмотрено в работе [11].

В исследовании [4] предложены комплексные схемы формирования и нормализации микроклимата калийных рудников, в том числе осушения воздухоподающих горных выработок. В частности, разработаны следующие технические решения:

– многоступенчатая система обработки и регулирования микроклиматических параметров рудничного воздуха, включающая в себя технологические узлы обработки воздуха

на поверхности, в околоствольных дворах и отдельных участках подземных горных выработок;

– использование специальных теплообменных выработок с применением энергии и сорбционных свойств породного массива, энергетической емкости подземных рассолооборников;

– использование рециркуляционного проветривания.

При этом следует отметить, что реализация на практике систем кондиционирования (осушения) рудничного воздуха требует неоправданно больших капитальных затрат. Возможность использования рециркуляционного проветривания доказана с помощью полученных экспериментальных данных, однако детальных исследований, посвященных изучению механизмов осушения атмосферы горных выработок при использовании систем рециркуляции, не проводилось.

В работах [12–14] отражены исследования производительности разного рода систем осушения шахтного воздуха, выполненные зарубежными учеными.

В исследовании [8] предлагается применение водяных калориферных установок рудника для охлаждения воздуха, поступающего в ствол, и его конденсационного осушения. Однако использование данного мероприятия на практике требует разработки калориферных установок и теплообменных аппаратов в ином исполнении, нежели существующие. Это связано с образованием значительного количества конденсационной влаги на элементах теплообменных аппаратов, что совместно с наличием соляной пыли создает агрессивную среду и приводит к их скорому разрушению и выходу из строя. Таким образом, для реализации данного мероприятия необходимо создание новых, двухсезонных калориферных установок в особом, влагоустойчивом исполнении, что также приведет к резкому возрастанию их стоимости.

В настоящее время на калийных рудниках широкое применение нашли системы автоматического управления проветриванием (САУП), которые позволяют строить наиболее эффективные и надежные системы вентиляции. Разработка систем автоматического управления проветриванием имеет следующие концептуальные направленности:

– повышение оперативности контроля и управления проветриванием подземных рабочих зон и, соответственно, повышение безопасности ведения горных работ;

– снижение энергетических затрат на обеспечение вентиляции рудника.

Разработке теоретических и технических основ построения САУП посвящены работы Ф.А. Абрамова [15], Л.А. Пучкова [16], С.В. Цоя [17], Б.П. Казакова, Ю.В. Круглова, Л.Ю. Левина [18–21] и других [22–24].

Концепция САУП и опыт применения системы на рудниках зарубежных горнодобывающих предприятий описаны в работах [25–29].

На сегодняшний день разработаны и опробованы на практике следующие технические средства САУП:

1) вентиляторные установки с частотным регулированием привода, позволяющие в широком диапазоне регулировать аэродинамические и мощностные параметры работы;

2) рециркуляционные установки с необходимой системой контроля аэродинамических и газодинамических параметров проветривания отдельных участков шахтного поля;

3) автоматические вентиляционные двери, обеспечивающие возможность плавного регулирования аэродинамического сопротивления.

В цикле работ построена теория и алгоритмическая база, разработаны соответствующие программные модули, позволяющие регулировать работу элементов САУП и обеспечивать оптимальные режимы проветривания, характеризующиеся такими параметрами работы средств управления вентиляцией, что все рабочие зоны рудника получают необходимое количество воздуха при одновременной минимизации мощности, потребляемой вентиляторными установками вентиляционной сети [20].

Несмотря на то что средства САУП открывают широкие возможности управления аэродинамическими характеристиками движения воздушных потоков в горных выработках, возможность их использования для управления температурно-влажностными параметрами рудничного воздуха обычно не

рассматривается. В то же время можно считать доказанным влияние аэродинамических характеристик проветривания на формирование термовлажностных параметров рудничной атмосферы [30–32].

В работах [33–35] описан опыт моделирования процессов теплообмена и управления термодинамическими процессами в горных выработках глубоких рудников зарубежных горных предприятий.

В данном исследовании рассматриваются возможности использования средств САУП для управления термодинамическими процессами в атмосфере шахт и рудников и уменьшения количества конденсируемой влаги в калийных рудниках в теплый период времени года.

На первом этапе исследована зависимость интенсивности выпадения влаги в выработке от расхода воздуха.

Зависимость интенсивности выпадения влаги от расхода воздуха

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

$$\frac{dm}{dt} = \Delta d(T, \varphi_{кр}, P) \cdot \rho \cdot Q, \tag{1}$$

где m – масса влаги, кг; d – влагосодержание воздуха, кг/кг, определятся по $I-d$ диаграмме; T – температура воздуха, °C; $\varphi_{кр}$ – критическая относительная влажность воздуха, %; P – абсолютное давление воздуха, Па; ρ – плотность воздуха, кг/м³; Q – расход воздуха в выработке, м³/с.

Через изменение температуры данное выражение можно представить в виде

$$\frac{dm}{dt} = \frac{\partial d(T, \varphi_{кр}, P)}{\partial T} \Delta T \cdot \rho \cdot Q. \tag{2}$$

Входящую в выражение частную производную влагосодержания от температуры можно вычислить следующим образом:

$$\frac{\partial d(T, \varphi_{кр}, P)}{\partial T} = \frac{0,00020412 \cdot P \cdot (11,52 + 1,62 \cdot T) \varphi_{кр}}{(0,001 \cdot P + (-611,71 - 37,33 \cdot T - 2,6244 \cdot T^2) \varphi_{кр})^2}, \tag{3}$$

Разница температуры между началом и концом участка горных выработок в установившемся режиме может быть определена при помощи выражения:

$$\Delta T = T_m + (T_0 - T_m) e^{-\frac{\alpha PL}{cSv}}, \tag{4}$$

где T_0 – температура воздуха в начале выработки, °C; T_m – температура стенок горной выработки, °C; P – периметр выработки, м; α – коэффициент теплоотдачи на стенке выработки, Вт/м²·°C; L – длина выработки, м; c – удельная теплоемкость воздуха, Дж/м³·°C; S – площадь сечения выработки, м²; v – скорость движения воздуха по выработке, м/с.

В данном случае процесс теплообмена считается установившимся, то есть квазистационарным, и температура стенок массива локально во времени неизменна. Зависимость коэффициента теплоотдачи α от скорости движения воздуха определяется формулой Щербаня [30]:

$$\alpha = 3,4 \cdot \frac{v^{0,8}}{d^{0,2}}. \tag{5}$$

Подставляя выражения (5) и (4) и находя из исходного выражения (3) разность влагосодержания Δd , выражение для него получаем в виде:

$$\Delta d = \frac{0,00020412 \cdot P \cdot (11,52 + 1,62 \cdot T) \varphi_{кр}}{(0,001 \cdot P + (-611,71 - 37,33 \cdot T - 2,6244 \cdot T^2) \varphi_{кр})^2} \times \left(T_m + (T_0 - T_m) \exp\left(-\frac{3,4 \cdot P \cdot L}{c \cdot S \cdot d^{0,2} \cdot v^{0,2}}\right) \right). \tag{6}$$

Из полученного выражения следует, что разность влагосодержания между началом и концом участка слабо зависит от скорости движения воздуха по горным выработкам, что физически эквивалентно утверждению о том, что увеличение/уменьшение времени теплообмена практически полностью компенсируется уменьшением/увеличением его интенсивности.

Таким образом, разница влагосодержания воздуха в начале и конце участка слабо зависит от расхода воздуха (увеличение времени теплообмена компенсируется уменьшением его интенсивности). На основании этого можно принять, что скорость выпадения влаги на участке горных выработок линейно зависит от расхода воздуха через участок:

$$\frac{dm}{dt} = K \cdot Q, \tag{7}$$

где коэффициент K , равный количеству конденсируемой влаги в выработке, отнесенному к расходу воздуха в ней, в первом приближении можно считать не зависящим от расхода воздуха (в действительности в соответствии со всем вышеизложенным зависимость существует, но слабая). Данный коэффициент определяется только параметрами теплового режима рудника в теплый период времени года – температурой и влажностью воздуха, поступающего в рудник, и температурой горных пород.

Способы осушения горных выработок с использованием средств систем автоматического управления проветриванием

Во введении было показано, что существующая концепция применения САУП не ориентирована на их использование в качестве средства регулирования термовлажностных параметров в атмосфере горных выработок. В то же время, как уже было показано и рассмотрено, аэродинамические параметры, такие как распределение скоростей и давлений в рудничной вентиляционной сети, самым непосредственным образом влияют на формирование распределения тепла и влаги в горных выработках рудника. Таким образом, управляя аэродинамическими параметрами посредством возможностей САУП, можно влиять на формирование микроклиматических параметров атмосферы шахт и рудников. Поэтому рассмотрим возможности использования средств САУП для управления термодинамическими процессами, происходящими в рудничной атмосфере, на основе установленной зависимости количества влаги, выпадающего в единицу времени, в виде выражения (7).

Согласно принятым техническим нормативам подачу воздуха осуществляют с некоторым запасом, определяемым на этапе расчета количества воздуха через коэффициенты утечек и неравномерности. Коэффициент неравномерности характеризует погрешность управления аэродинамическими параметрами средств системы вентиляции. Так, при известной относительной погрешности средств отрицательного регулирования ε_R необходимый коэффициент запаса будет определяться следующим образом:

$$K_s = 1 + \frac{\varepsilon_R}{2}. \tag{8}$$

В итоге в подземные выработки рудника будет подаваться избыточное количество воздуха ΔQ , равное:

$$\Delta Q = \frac{\varepsilon_R}{2} Q_{расч}, \tag{9}$$

где $Q_{расч}$ – фактическое расчетное количество воздуха без учета коэффициента неравномерности.

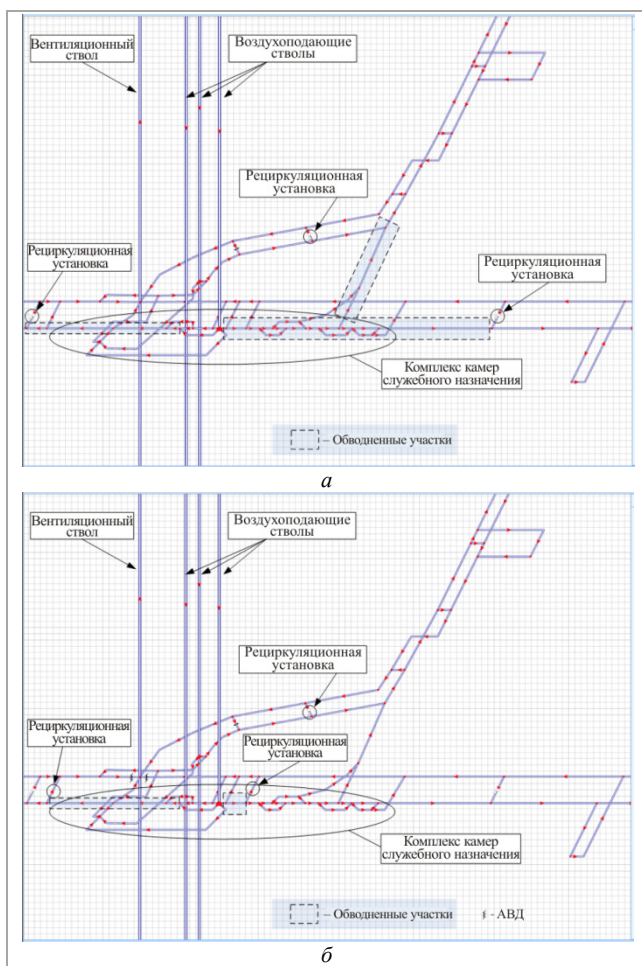


Рис. Традиционная схема (а) размещения средств рециркуляционного проветривания и зоны выпадения влаги в воздухоподающих выработках и предлагаемая схема (б) размещения средств рециркуляционного проветривания для осушения главных воздухоподающих выработок и камер служебного назначения

Соответственно в рудник в каждый момент времени будет заноситься дополнительное количество влаги в объеме:

$$\Delta m = K \frac{\epsilon_R}{2} Q_{расч} \quad (10)$$

Согласно результатам последних исследований, традиционные средства отрицательного и положительного управления воздушораспределением создают фактические коэффициенты неравномерности в интервале от 1,3 до 1,6. Даже несмотря на этот факт, нормативные коэффициенты неравномерности на калийных рудниках колеблются в интервале от 1,1 до 1,25. На практике это приводит к выпадению от 10 до 25 % дополнительной влаги (от общей массы) в рудник в теплый период времени.

Одна из основополагающих идей использования САУП заключается в том, что средства контроля и управления воздушными потоками позволяют в разы увеличить точность (соответственно снизить погрешность) регулирования. Погрешность регулирования воздушораспределения при помощи автоматических вентиляционных дверей (ABD) и рециркуляционных установок составляет от 8 до 10 %, что позволяет обеспечивать коэффициент запаса не более 1,05. Таким образом, использование САУП позволяет снижать подачу избыточного количества воздуха и, соответственно, выпадение конденсационной влаги в воздухоподающие выработки рудника.

Важным компонентом современных САУП являются системы рециркуляционного проветривания для частичного повторного использования воздуха.

В работах [36–39] рециркуляция рассматривается как потенциальный метод энергосбережения за счет уменьшения внешнего притока воздуха.

Кроме того, системы рециркуляционного проветривания могут быть рассмотрены в качестве средства осушения горных выработок. В работах [4, 40, 41] показано, что воздушный поток, двигаясь по выработкам в гигроскопичных горных породах, осушается вследствие массообменных процессов между воздухом и породами. Таким образом, воздух естественным образом осушается и может быть использован для осушения воздухоподающих выработок.

Существующие схемы частичного повторного использования воздуха предполагают установку рециркуляционных вентиляторов за пределами околоствольных дворов и камер служебного назначения так, как это приведено на рисунке. Это вызвано двумя причинами:

- неблагоприятным режимом работы рециркуляционных установок в условиях высоких общешахтных депрессий, характерных для околоствольных дворов верхних горизонтов;
- возможностью улучшения вентиляции удаленных участков шахтного поля.

Основная задача рециркуляционных установок – обеспечить возможность снижения количества воздуха, подаваемого в рудник, за счет работы главной вентиляционной установки. Однако при таком их размещении в контур не попадают участки главных воздухоподающих выработок и камеры служебного назначения, расположенные в околоствольном дворе, а именно с ними связаны основные проблемы выпадения влаги в теплый период времени года. Таким образом, в теплый период времени года все эти участки обводнены так, как это показано на рисунке, а.

Поэтому учет фактора возможности осушения данных выработок позволяет иметь в виду вероятность переноса места размещения рециркуляционной установки с целью вовлечения максимально возможного объема выработок в рециркуляционный контур. При этом установка автоматических средств отрицательного регулирования в главных вентиляционных выработках в районе их сопряжения с вентиляционным стволом создает возможность управления величиной общешахтной депрессии околоствольного двора и отдельных направлений. Это позволяет нивелировать сложности обеспечения работы рециркуляционных установок в зоне со значительной величиной общешахтной депрессии.

На рисунке, б, представлена усовершенствованная схема рециркуляционного проветривания с использованием средств САУП для осушения воздухоподающих выработок и камер служебного назначения.

К вопросу о работе рециркуляционных установок в зоне с большей депрессией главной вентиляционной установки, направленной против работы рециркуляционного вентилятора. Для обеспечения устойчивости его работы требуется обязательное размещение АВД вблизи рециркуляционной установки, вне контура для регулирования воздушораспределения между направлениями рудника, и снижение нагрузки на рециркуляционную установку. При этом изменение сопротивления АВД эквивалентно изменению приведенной эквивалентной напорной характеристики главной вентиляционной установки на направлении, на котором работает рециркуляционная установка.

Таким образом, использование средств САУП позволяет значительным образом расширить объем горных выработок, задействованных в рециркуляционном проветривании в пределах шахтного поля, и область изменения его параметров, подбирая наиболее эффективные для осушения камер служебного назначения и транспортных выработок рудника.

Заключение

На основании результатов исследований использования средств САУП для управления термодинамическими процессами в рудничной атмосфере можно сделать следующие выводы:

- количество конденсируемой влаги в горной выработке в единицу времени в теплый период времени года в основном определяется расходом воздуха, начальными

микроклиматическими параметрами воздуха и температурой массива горных пород;

– применение САУП на калийных рудниках позволит снизить нормативные коэффициенты неравномерности, что приводит к снижению количества влаги на главных воздухоподводящих выработках;

– установка автоматических вентиляционных дверей на главных вентиляционных выработках в районе их сопряжения

с вентиляционным стволом создает благоприятные условия работы рециркуляционных установок, осушающих комплекс камер служебного назначения.

На основании полученных результатов разработаны и внедрены системы осушения выработок околоствольного двора и главных воздухоподводящих штреков с использованием средств систем автоматического управления проветриванием для всех рудников ОАО «Беларуськалий».

Библиографический список

1. Барях А.А., Константинова С.А., Асанов В.А., Деформирование соляных пород. – Екатеринбург: УрО РАН, 1996. – 203 с.
2. Евсеев А.В. Обеспечение устойчивости кровли очистных камер в условиях повышенного содержания глины в соляном массиве: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2011. – 21 с.
3. Van Sambeek L.L. Measurements of humidity-enhanced salt creep in salt mines: proving the Joffe effect // *Mechanical Behavior of Salt VII*. – 2012. – С. 179–184. DOI: 10.1201/b12041-25
4. Казаков Б.П. Формирование и нормализация микроклимата подземных рудников при разработке месторождений калийных солей. дис. ... д-ра техн. наук. – Пермь, 2001.
5. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников. – Свердловск: УрО АН СССР, 1990. – 252 с.
6. Казаков Б. П., Трушкова Н. А., Зайцев А. В. Применение частичного повторного использования воздуха для снижения количества выпадающей влаги в калийных рудниках // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология, нефтегазовое и горное дело. – 2012. – Т. 11, № 3. – С. 129–133.
7. Лужецкая Н.Д. Исследование микроклимата и уточнение методики его расчета для условий калийных рудников (на примере Верхнекамского месторождения калийных солей): дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 1974. – 276 с.
8. Левин Л.Ю. Исследование и разработка ресурсосберегающих систем воздухоподготовки для рудников: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь: 2004. – 143 с.
9. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts // *Thermal Science and Engineering Progress*. – 2020. – Vol. 20. – P. 100760. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760
10. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Исследование процессов миграции конденсационных рассолов в выработках калийных рудников // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 11. – С. 216–225.
11. Improving thermal comfort of high-temperature environment of heading face through dehumidification / H.Q. Wang, Z.Y. Zou, S.Q. Chen, Y.Q. Li // *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. – 2010. – Vol. 16, № 4. – P. 389–393. DOI: 10.1007/s12404-010-0411-1
12. Guo Z., Miao D., Kong L. Research on performance of mine dehumidification and cooling system based on heat pump // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 647, № 1. – P. 012083. DOI:10.1088/1755-1315/647/1/012083
13. O'berg V., Goswami D.Y. Experimental study of the heat and mass transfer in a packed bed liquid desiccant air dehumidifier. – 1998. – P. 289–297. DOI: 10.1115/1.2888133
14. Liu C. Application of Temperature and Humidity Independent Control Cooling System in Cooling Deep Mine // *Metal Mine*. – 2014. – Vol. 43, № 10. – P. 133.
15. Абрамов Ф.А., Бойко В.А. Автоматизация проветривания шахт. – Киев: Наукова думка, 1967.
16. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. – М.: Недра, 1992.
17. Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. – Алма-Ата: Наука, 1975.
18. Совершенствование ресурсосберегающих систем вентиляции рудников Верхнекамского месторождения калийных солей / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, Ю.В. Круглов, А.Г. Исаевич, А.В. Шалимов // Горный журнал. – 2010. – № 8. – С. 81–83.
19. Круглов Ю.В. Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: дис. ... канд. тех. наук. – Пермь, 2006.
20. Круглов Ю.В. Научно-технические основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодн. научн. сессии ГИ УрО РАН. – Пермь, 2011. – С. 100–102.
21. Левин Л.Ю. Исследование динамики воздушных потоков вентиляционных сетей и разработка безопасных, энергосберегающих систем вентиляции рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сборник научных трудов. – Пермь: ГИ УрО РАН, 2011. – Вып. 9. – С. 233–234.
22. Semin M.A., Levin L.Y., Maltsev S.V. Development of automated mine ventilation control systems for Belarusian potash mines // *Archives of Mining Sciences*. – 2020. – Vol. 65, № 4. – P. 803–820. DOI: 10.24425/ams.2020.135178
23. Automated ventilation control in mines. Challenges, state of the art, areas for improvement / M.A. Semin, E.L. Grishin, L.Y. Levin, A.V. Zaitsev // *Journal of Mining Institute*. – 2020. – Vol. 246. – P. 623–632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4
24. Поспелов Д.А., Зайцев А.В., Семин М.А. Совершенствование алгоритма автоматизированного управления проветриванием калийных рудников // Горное эхо. – 2021. – № 1. – С. 133–138. DOI: 10.7242/echo.2021.1.24
25. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff // *Applied Energy*. – 2015. – Vol. 146. – P. 65–73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134
26. Acuña E. I., Alvarez R. A., Hurtado J. P. Updated Ventilation On Demand review: implementation and savings achieved // *Proceedings of the 1st International Conference of Underground Mining / eds. R. Castro & M. Valencia*. – 2016. – P. 606–617.
27. A cyber-physical system approach for enabling ventilation on-demand in an underground mining site / N. Nikolakis, G. Kantaris, K. Bourmpouchakis, K. Alexopoulos // *Procedia CIRP*. – 2021. – Vol. 97. – P. 487–490. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.265
28. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников / Е.Л. Гришин, Е.В. Накаряков, Н.А. Трушкова, А.Н. Санникович // Горный журнал. – 2018. – № 8. – С. 103–108. DOI: 10.7242/echo.2021.1.24
29. de Vilhena Costa L., Margarida da Silva J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand // *Mining Technology*. – 2020. – Vol. 129, № 1. – P. 1–8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581
30. Щербань А.Н., Кремнев О.А., Журавленко В.Я. Руководство по регулированию теплового режима шахт: 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1977. – 359 с.
31. Щербань А.Н., Кремнев О.А. Основы теории и методы тепловых расчетов рудничного воздуха. – М.: Углетехиздат, 1953.
32. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Зайцев А.В. Влияние процессов испарения и конденсации влаги на тепловой режим глубоких рудников // Горный журнал. – 2016. – № 3. – С. 73–76.
33. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways // *International Journal of Mining and Geological Engineering*. – 1986. – Vol. 4, № 3. – P. 165–195. DOI: 10.1007/BF01560715
34. Ryan A., Euler D.S. Heat stress management in underground mines // *International Journal of Mining Science and Technology*. – 2017. – Vol. 27. – № 4. – P. 651–655. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.020
35. Wagner H. The management of heat flow in deep mines // *Mining Report*. – 2013. – Vol. 149, № 2. – P. 88–100. DOI: 10.1002/geot.201100006
36. Hall A.E., McHanna D.M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines // *Mining Science and Technology*. – 1990. – Vol. 10, № 3. – P. 305–314. DOI:10.1016/0167-9031(90)90504-L
37. Wu H.W., Gillies A.D.S., Nixon A.C. Trial of controlled partial recirculation of ventilation air at Mount Isa Mines // *Mining Technology*. – 2001. – Vol. 110, № 2. – P. 86–96. DOI: 10.1179/mnt.2001.110.2.86
38. Pritchard C., Scott D., Frey G. Case study of controlled recirculation at a Wyoming trona mine // *Transactions of Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.* – 2013. – Vol. 334, № 1. – P. 444.
39. Левин Л.Ю., Круглов Ю.В. Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 10. – С. 30–48.
40. Береснев Б.П., Снежневский А.Ю. Использование процессов теплообмена для тепловлажной обработки воздуха в калийном руднике на примере РУ-4 ПО «Беларуськалий» // Проблемы рудничной аэрологии и безопасной разработки месторождений полезных ископаемых. – Пермь, 2004. – С. 22–25.
41. Исаевич А.Г. Повторное использование воздуха при проветривании калийных рудников // Стратегия и процессы освоения георесурсов. – 2005. – С. 232–235.
42. Hinsley F.B., Morris W.I. Removal of moisture and heat from a Hotts Mine by ventilation. – Iron and Coal, X, 1950.
43. Дударь Е.С. Исследование процессов теплопереноса в калийных рудниках и конденсации влаги в шахтной вентиляционной сети: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тула, 2011. – 22 с.
44. Дударь О.И., Дударь Е.С., Мохирев Н.Н. Математическая модель процесса конденсации влаги при движении воздуха в вентиляционной сети калийного рудника // Информатика, инновации, инвестиции: материалы всерос. конф. – Пермь, 2003. – С. 163–164.
45. Медведев Б.И. Регулирование тепловых условий в лавах путем распределенной подачи охлажденного воздуха // Труды семинара по горной теплотехнике. – М.: Изд-во АН УССР, 1950. – Вып. 2.

References

1. Bariakh A.A., Konstantinova S.A., Asanov V.A., Deformirovanie solianyykh porod [Deformation of salt rocks]. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 1996, 203 p.
2. Evseev A.V. Obespechenie ustoychivosti krovli ochistnykh kamer v usloviyakh povyshennogo soderzhaniiia gliny v solianom massive [Ensuring the stability of the roof of treatment chambers in conditions of high clay content in the salt massif]. Abstract of Ph. D. thesis. Perm', 2011, 21 p.
3. Van Sambeek L.L. Measurements of humidity-enhanced salt creep in salt mines: proving the Joffe effect. *Mechanical Behavior of Salt VII*, 2012, pp. 179–184. DOI: 10.1201/b12041-25
4. Kazakov B.P. Formirovanie i normalizatsiia mikroklimate podzemnykh rudnikov pri razrabotke mestorozhdenii kaliiynykh solei [Formation and normalization of the microclimate of underground mines during the development of deposits of potassium salts]. Doctor's degree dissertation. Perm', 2001.
5. Medvedev I.I., Krasnoshtein A.E. Aerologia kaliiynykh rudnikov [Aerology of potash mines]. Sverdlovsk: Ural'skoe otdelenie Akademii nauk SSSR, 1990, 252 p.
6. Kazakov B.P., Trushkova N.A., Zaitsev A.V. Primenenie chastichnogo povtornogo ispol'zovaniia vozdukh dlia snizheniia kolichestva vypadaushchei vlagi v kaliiynykh rudnikakh [Application of partial reuse of air to reduce the amount of moisture precipitate in potash mines]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya, neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, vol. 11, no. 3, pp. 129–133.
7. Luzhetskaia N.D. Issledovanie mikroklimate i utocnenie metodiki ego rascheta dlia uslovii kaliiynykh rudnikov (na primere Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliiynykh solei) [Investigation of the microclimate and refinement of the methodology for its calculation for the conditions of potash mines (on the example of the Verkhnekamskoye potash salt deposit)]. Ph. D. thesis. Perm', 1974, 276 p.

8. Levin L.Iu. Issledovanie i razrabotka resursosberegaiushchikh sistem vozdukhopodgotovki dlia rudnikov [Research and development of resource-saving air treatment systems for mines]. Ph. D. thesis. Perm', 2004, 143 p.
9. Semin M., Zaitsev A. On a possible mechanism for the water build-up formation in mine ventilation shafts. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2020, vol. 20, 100760 p. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100760
10. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Zaitsev A.V. Issledovanie protsessov migratsii kondensatsionnykh rassolov v vyrobokakh kaliinykh rudnikov [Modeling of processes of migration condensing brines in mining potash mines]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2016, no. 11, pp. 216-225.
11. Wang H.Q., Zou Z.Y., Chen S.Q., Li Y.Q. Improving thermal comfort of high-temperature environment of heading face through dehumidification. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 2010, vol. 16, no. 4, pp. 389-393. DOI: 10.1007/s12404-010-0411-1
12. Guo Z., Miao D., Kong L. Research on performance of mine dehumidification and cooling system based on heat pump. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021, vol. 647, no. 1, 012083 p. DOI:10.1088/1755-1315/647/1/012083
13. Oberg V., Goswami D.Y. Experimental study of the heat and mass transfer in a packed bed liquid desiccant air dehumidifier, 1998, pp. 289-297. DOI: 10.1115/1.2888133
14. Liu C. Application of Temperature and Humidity Independent Control Cooling System in Cooling Deep Mine. *Metal Mine*, 2014, vol. 43, no. 10, 133 p.
15. Abramov F.A., Boiko V.A. Avtomatizatsiia provetrivaniia shakht [Mine ventilation automation]. Kiev: Naukova dumka, 1967.
16. Puchkov L.A., Bakhvalov L.A. Metody i algoritmy avtomaticheskogo upravleniia provetrivaniem ugol'nykh shakht [Methods and algorithms for automatic control of ventilation of coal mines]. Moscow: Nedra, 1992.
17. Tsoi S.V. Avtomaticheskoe upravlenie ventilatsionnymi sistemami shakht [Automatic control of mine ventilation systems]. Alma-Ata: Nauka, 1975.
18. Kazakov B.P., Levin L.Iu., Kruglov Iu.V., Isaevich A.G., Shalimov A.V. Sovershenstvovanie resursosberegaiushchikh sistem ventilatsii rudnikov Verkhnekamskogo mestorozhdeniia kaliinykh solei [Improvement of resource-saving ventilation systems of the mines of the Verkhnekamskoye potassium salt deposit]. *Gornyi zhurnal*, 2010, no. 8, pp. 81-83.
19. Kruglov Iu.V. Modelirovanie sistem optimal'nogo upravleniia vozdukhoraspredeleniem v ventilatsionnykh setiakh podzemnykh rudnikov [Modeling of systems for optimal control of air distribution in ventilation networks of underground mines]. Ph. D. thesis. Perm', 2006.
20. Kruglov Iu.V. Nauchno-tekhnicheskie osnovy postroeniia optimal'nykh sistem avtomaticheskogo upravleniia provetrivaniem podzemnykh rudnikov [Scientific and technical foundations for constructing optimal systems for automatic control of ventilation of underground mines]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov. Materialy ezhegodnoi nauchnoi sessii Gornogo instituta Ural'skogo otdeleniia RAN*. Perm', 2011, pp. 100-102.
21. Levin L.Iu. Issledovanie dinamiki vozdushnykh potokov ventilatsionnykh setei i razrabotka bezopasnykh, energosberegaiushchikh sistem ventilatsii rudnikov [Study of the dynamics of air flows in ventilation networks and the development of safe, energy-saving ventilation systems for mines]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov. Sbornik nauchnykh trudov*. Perm': Gornyi institut Ural'skogo otdeleniia RAN, 2011, iss. 9, pp. 233-234.
22. Semin M.A., Levin L.Y., Maltsev S.V. Development of automated mine ventilation control systems for Belarusian potash mines. *Archives of Mining Sciences*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 803-820. DOI: 10.24425/ams.2020.135178
23. Semin M.A., Grishin E.L., Levin L.Y., Zaitsev A.V. Automated ventilation control in mines. Challenges, state of the art, areas for improvement. *Journal of Mining Institute*, 2020, vol. 246, pp. 623-632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4
24. Pospelov D.A., Zaitsev A.V., Semin M.A. Sovershenstvovanie algoritma avtomatizirovannogo upravleniia provetrivaniem kaliinykh rudnikov [Improving the algorithm for automated control of ventilation of potash mines]. *Gornoe ekho*, 2021, no. 1, pp. 133-138. DOI: 10.7242/echo.2021.1.24
25. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Applied Energy*, 2015, vol. 146, pp. 65-73. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.134
26. Acuña E.I., Alvarez R.A., Hurtado J.P. Updated Ventilation on Demand review: implementation and savings achieved. *Proceedings of the 1st International Conference of Underground Mining*. Eds. R. Castro & M. Valencia, 2016, pp. 606-617.
27. Nikolakis N., Kantaris G., Bourmpouchakis K., Alexopoulos K. A cyber-physical system approach for enabling ventilation on-demand in an underground mining site. *Procedia CIRP*, 2021, vol. 97, pp. 487-490. DOI: 10.1016/j.procir.2020.05.265
28. Grishin E.L., Nakariakov E.V., Trushkova N.A., Sanikovich A.N. Opyt vnedreniia sistem dinamicheskogo upravleniia provetrivaniem rudnikov [Experience in implementing dynamic control systems for mine ventilation]. *Gornyi zhurnal*, 2018, no. 8, pp. 103-108. DOI: 10.7242/echo.2021.1.24
29. de Vilhena Costa L., Margarida da Silva J. Cost-saving electrical energy consumption in underground ventilation by the use of ventilation on demand. *Mining Technology*, 2020, vol. 129, no. 1, pp. 1-8. DOI: 10.1080/25726668.2019.1651581
30. Shcherban' A.N., Kremnev O.A., Zhuravlenko V.Ia. Rukovodstvo po regulirovaniu teploвого rezhima shakht [Guidelines for the regulation of the thermal regime of mines]. 3rd ed. Moscow: Nedra, 1977, 359 p.
31. Shcherban' A.N., Kremnev O.A. Osnovy teorii i metody teplovykh raschetov rudnichnogo vozdukh [Fundamentals of the theory and methods of thermal calculations of mine air]. Moscow: Ugletekhdiz, 1953.
32. Kazakov B.P., Shalimov A.V., Zaitsev A.V. Vliianie protsessov ispareniia i kondensatsii vlagi na teplovoi rezhim glubokikh rudnikov [Influence of moisture evaporation and condensation processes on the thermal regime of deep mines]. *Gornyi zhurnal*, 2016, no. 3, pp. 73-76.
33. McPherson M.J. The analysis and simulation of heat flow into underground airways. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 1986, vol. 4, no. 3, pp. 165-195. DOI: 10.1007/BF01560715
34. Ryan A., Euler D.S. Heat stress management in underground mines. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2017, vol. 27, no. 4, pp. 651-655. DOI: 10.1016/j.ijmst.2017.05.020
35. Wagner H. The management of heat flow in deep mines. *Mining Report*, 2013, vol. 149, no. 2, pp. 88-100. DOI: 10.1002/geot.201100006
36. Hall A.E., McHaina D.M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines. *Mining Science and Technology*, 1990, vol. 10, no. 3, pp. 305-314. DOI:10.1016/0167-9031(90)90504-L
37. Wu H.W., Gillies A.D.S., Nixon A.C. Trial of controlled partial recirculation of ventilation air at Mount Isa Mines. *Mining Technology*, 2001, vol. 110, no. 2, pp. 86-96. DOI: 10.1179/mnt.2001.110.2.86
38. Pritchard C., Scott D., Frey G. Case study of controlled recirculation at a Wyoming trona mine. *Transactions of Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc*, 2013, vol. 334, no. 1, 444 p.
39. Levin L.Iu., Kruglov Iu.V. Issledovanie retsirkulatsionnogo sposoba provetrivaniia kaliinykh rudnikov i ego ekonomicheskaiia effektivnost' [Study of the recirculation method of ventilation of potash mines and its economic efficiency]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2008, no. 10, pp. 30-48.
40. Beresnev B.P., Snezhnevskii A.Iu. Ispol'zovanie protsessov teplomassoobmena dlia teplovlazhnostnoi obrabotki vozdukhva v kaliinom rudnike na primere RU-4 PO "Belaruskalii" [The use of heat and mass transfer processes for heat and moisture treatment of air in a potash mine on the example of mining department 4 of Belaruskalii]. *Problemy rudnichnoi aerologii i bezopasnoi razrabotki mestorozhdenii poleznykh iskopaemykh*. Perm', 2004, pp. 22-25.
41. Isaevich A.G. Povtornoie ispol'zovanie vozdukhva pri provetrivaniia kaliinykh rudnikov [Air reuse for ventilation of potash mines]. *Strategiia i protsessy osvoeniia georesurov*, 2005, pp. 232-235.
42. Hinsley F.B., Morris W.I. Removal of moisture and heat from a Hotts Mine by ventilation. *Iron and Coal*, X, 1950.
43. Dudar' E.S. Issledovanie protsessov teplomassopereenosy v kaliinykh rudnikakh i kondensatsii vlagi v shakhtnoi ventilatsionnoi seti [Study of Heat and Mass Transfer Processes in Potash Mines and Moisture Condensation in the Mine Ventilation Network]. Abstract of Ph. D. thesis. Tula, 2011, 22 p.
44. Dudar' O.I., Dudar' E.S., Mokhirev N.N. Matematicheskaiia model' protsessy kondensatsii vlagi pri dvizhenii vozdukhva v ventilatsionnoi seti kaliinogo rudnika [Mathematical model of the process of moisture condensation during air movement in the ventilation network of a potash mine]. *Informatsiia, innovatsii, investitsii. Materialy vs Rossiiskoi konferentsii*. Perm', 2003, pp. 163-164.
45. Medvedev B.I. Regulirovanie teplovykh uslovii v lavakh putem raspredelennoi podachi okhlazhdennoogo vozdukhva [Regulation of thermal conditions in longwalls by distributed supply of cooled air]. *Trudy seminara po gornoi teplotekhnike*. Moscow: Akademiia nauk USSR, 1950, iss. 2.

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках проекта № 19-77-30008.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.