



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

Научная статья

<https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-210>

УДК 622.41

**Влияние сорбционных свойств калийных солей на газовую обстановку в тупиковых горных выработках**А. Н. Стариков^{1,2} , С. В. Мальцев² , А. Е. Суханов² ¹Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация²Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация

starikov4488@mail.ru

Аннотация

Результаты газоздушных съемок, выполняемых на рудниках Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей, показывают, что объем газообразных примесей, фиксируемый в главных вентиляционных штреках рудника, зачастую значительно меньше, чем в рабочих зонах тупиковых выработок. Феномен снижения газовых примесей по пути движения вентиляционной струи воздуха на калийных рудниках во многих исследованиях связывают не только с разбавлением вредных примесей утечками свежего воздуха с воздухоподающих штреков, но и с нейтрализацией газов за счет их химических реакций с калийным массивом. Результаты исследований, проведенных ранее в лабораторных условиях, показали, что сильвинит ($\text{NaCl} + \text{KCl}$) способен поглощать примеси токсичных и горючих газов. На основе результатов лабораторного изучения в рамках настоящей работы проведены исследования в условиях реального рудника, учитывающие динамику газовых примесей в атмосфере горных выработок и фактор разбавления газовых примесей утечками воздуха. В рамках работы выполнены замеры концентрации горючих и токсичных газов на продуктивных пластах разного минерального состава на одном из рудников ВМКМС для оценки влияния свойств калийных солей на газовый баланс в тупиковых выработках большой протяженности. Выполнен анализ степени влияния свойств калийного массива на изменение концентрации горючих и токсичных газов в выработках по пути движения вентиляционной струи воздуха. Анализ отобранных образцов воздуха проводился в лабораторных условиях. Концентрация горючих газов, оксида и диоксида углерода, содержащихся в отобранных образцах воздуха, производилась хроматографическим методом на приборе «ХРОМОС ГХ-1000». Оценена доля влияния нейтрализации газа и разбавления утечками вентиляционного трубопровода на снижение количества горючих и токсичных газов в исходящей из рабочей зоны струе воздуха. В результате проведенных экспериментов установлено, что в протяженных тупиковых камерах пласта АБ (100 м и более) количество газовых примесей снижается по протяженности выработки от тупика к устью. При проведении исследований учтены факторы, способные повлиять на снижение концентрации газа в рабочей зоне.

Ключевые слова

рудник, газовый режим, пробы, концентрация газа, сорбция, утечки, газовая съемка, сильвинит, калийный массив, метан, оксид углерода, диоксид углерода, сероводород, проветривание, рудничная вентиляция

Финансирование

Работа выполнена в рамках крупного научного проекта при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение № 075-15-2024-535 от 23.04.2024).

Для цитирования

Starikov A. N., Maltsev S. V., Sukhanov A. E. Influence of the sorption properties of potash salts on the gas environment in dead-end mine workings. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;10(1):25–33. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-210>

TECHNOLOGICAL SAFETY

Research paper

Influence of the sorption properties of potash salts on the gas environment in dead-end mine workingsA. N. Starikov^{1,2} , S. V. Maltsev² , A. E. Sukhanov² ¹Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation²Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

starikov4488@mail.ru

Abstract

The results of gas-air surveys conducted at the mines of the Verkhnekamsk potassium-magnesium salt deposit indicate that the volume of gaseous impurities recorded in the main ventilation drifts is often significantly lower than in the working areas of dead-end workings. Many studies attribute the reduction of gas impurities along the ventilation airflow path in potash mines not only to the dilution of harmful impurities due to fresh air leakage from intake drifts but also to the neutralization of gases through chemical reactions with the potash rock mass.



Previous laboratory studies have shown that sylvinit ($\text{NaCl} + \text{KCl}$) is capable of absorbing impurities of toxic and combustible gases. Based on these laboratory findings, the present study was conducted under real mining conditions, taking into account the dynamics of gas impurities in the underground atmosphere and the dilution effect caused by air leakage. As part of this study, measurements of combustible and toxic gas concentrations were conducted in productive seams of varying mineral composition at one of the mines of the Verkhnekamsk potassium-magnesium salt deposit to assess the influence of potash salt properties on the gas balance in long dead-end workings. An analysis was conducted to assess the extent to which the properties of the potash rock mass influence changes in the concentration of combustible and toxic gases in the workings along the ventilation airflow path. The collected air samples were analyzed under laboratory conditions. The concentration of combustible gases, carbon monoxide, and carbon dioxide in the collected air samples was determined using gas chromatography with the CHROMOS GX-1000 instrument. The contribution of gas neutralization and dilution due to leakage from the ventilation ducting to the reduction of combustible and toxic gases in the outgoing airflow from the working area was evaluated. The results of the conducted tests established that in long dead-end chambers of seam AB (100 m or more), the volume of gaseous impurities decreases along the length of the working from the dead end to the entry. The study accounted for factors that could influence the reduction of gas concentration in the working area.

Keywords

mine, gas regime, samples, gas concentration, sorption, leakage, gas survey, sylvinit, potash rock mass, methane, carbon monoxide, carbon dioxide, hydrogen sulfide, ventilation, mine ventilation

Acknowledges

This study was conducted as part of a major scientific project with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Agreement No. 075-15-2024-535 dated April 23, 2024).

For citation

Starikov A.N., Maltsev S.V., Sukhanov A.E. Influence of the sorption properties of potash salts on the gas environment in dead-end mine workings. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2024;10(1):25–33. <https://doi.org/10.17073/2500-0632-2024-01-210>

Введение

Разработка Верхнекамского месторождения калийных и магниевых солей (ВМКМС) ведется механизированным способом с помощью проходческо-очистных комбайновых комплексов. Оработка запасов таким способом почти всегда сопровождается высвобождением горючих и токсичных газов из массива в процессе его разрушения. Кроме того, источниками выделения газа являются отбитая руда, складываемая в бункере-перегрузателе и самоходном вагоне, а также сам прилегающий к выработкам обнаженный калийный массив. При этом на создание значительной концентрации газа в атмосфере горной выработки влияет выделение свободных газов из массива. Основной состав свободных газов ВМКМС: горючие – метан CH_4 и водород H_2 ; токсичные – сероводород H_2S . Кроме того, работа двигателей внутреннего сгорания, сварочные работы и т.д. служат источником накопления в рудничной атмосфере окиси углерода CO и других токсичных газовых примесей¹ [1].

Разбавление и вынос вредных примесей, выделяющихся в рабочих зонах, т.е. создание безопасной среды для нормальной физиологической деятельности человека, обеспечивается проветриванием.

Свежая струя воздуха, омывая рабочую зону, выносит выделявшиеся вредности по вентиляционным штрекам к вентиляционному стволу и на поверхность. Газовые съемки на рудниках ВМКМС выполняются для определения газообильности рабочих зон. Полученные значения относительной газообильности непосредственно влияют на расчет требуемого количества свежего воздуха для проветривания горной выработки. Определение корректных значений концентрации горючих и ядовитых газов в атмосфере

горной выработки крайне важно для создания эффективного проветривания рабочих зон рудника и обеспечения безопасных условий.

Статистическая обработка многолетних результатов газовоздушных съемок, проведенных на рудниках ВМКМС, показывает, что объем газовых примесей, фиксируемый в главных вентиляционных штреках, зачастую оказывается значительно меньше, чем в тупиковых забоях [2].

Процесс снижения объема газовых примесей по пути движения вентиляционной струи не всегда можно объяснить только разбавлением загрязненного воздуха утечками с воздухоподающих выработок. Феномен снижения концентрации газовых примесей по пути движения вентиляционной струи на калийных рудниках и ранее обращал на себя внимание в некоторых исследованиях. Так, в работе Медведева И.И. и Красноштейна А.Е. [3] описана способность калийных солей активно сорбировать газообразные примеси из рудничной атмосферы. Природу процесса нейтрализации газа авторы связывают с естественной радиоактивностью калийных руд, которая способствует запуску химических реакций между молекулами газа и молекулами минеральных частиц на поверхности массива. В работе Селивановой С.А.² также был описан процесс сорбции калийной солью вредных примесей из воздушной среды путем ряда хемосорбционных процессов, проявляющихся химическими реакциями под воздействием каталитического эффекта ионизирующего излучения изотопа Калий-40 и высокой гигроскопичности калийной соли. Возможность

¹ Ушаков К.З., Бурчаков А.С., Медведев И.И. *Рудничная аэрология*. М.: Недра; 1978.

² Селиванова С.А. Гигиенические особенности формирования и оптимизация физико-химических условий внутренней среды сальвинитовых сооружений. [Дисс. канд. мед. наук] Пермь: Пермский государственный медицинский университет им. академика Е.А. Вагнера; 2019.



поглощения калийными солями газообразных неорганических и органических веществ также описана в работе [4], где результаты исследования помогли создать подземный аллергологический стационар в действующем калийном руднике. Процессы самоочищения воздуха в соляных шахтах под влиянием свойств минерального состава горного массива описывались ранее в работах [5, 6]. Кроме того, в зарубежной литературе природу процесса самоочищения воздуха в соляных шахтах связывают с силами межмолекулярного притяжения [7, 8].

Результаты экспериментальных исследований, представленных в работе [9], подробно показали, что сильвинит ($\text{NaCl} + \text{KCl}$) способен поглощать примеси токсичных и горючих газов. В работе проведен анализ природы процессов сорбции газов калийными солями, а также сделано предположение, что естественная радиоактивность играет не основную роль в процессах поглощения газа калийным массивом. Выдвинута гипотеза, что в основе процесса сорбции газов калийным массивом лежат силы межмолекулярного взаимодействия [10].

Если процессы поглощения калийными солями газообразных примесей из рудничной атмосферы могут влиять на газовый баланс в пределах тупиковой выработки, то возникает необходимость учета этих процессов при проведении газовой съемки, а именно при отборе проб воздуха в тупиковой выработке [11]. Учитывая сведения о том, что массив горных пород может активно поглощать газообразные примеси, можно предположить, что количество газа в воздухе одной рабочей зоны может локально меняться в зависимости от расстояния от источника газовой выработки. Риск фиксации некорректных значений концентрации газа вследствие изменения его концентрации по длине выработки может привести к неверному расчету количества требуемого воздуха и повлиять на безопасность ведения горных работ. В связи с этим необходимо более детально разобраться с газовой обстановкой в пределах тупиковой камеры.

Исследования авторов работы [9], выполненные в лабораторных условиях, подтверждают способность калийных солей сорбировать горючие и ядовитые газы. Целью настоящего исследования является анализ динамики снижения концентрации газовых примесей в условиях подземных горных выработок калийного рудника. Основными задачами исследования являются проведение серии экспериментальных наблюдений в условиях действующего калийного рудника, анализ степени воздействия сорбционных свойств калийных солей на газовую обстановку, а также оценка воздействия утечек воздуха вентиляционного трубопровода на снижение концентрации газовых примесей в пределах тупиковых горных выработок.

Методы наблюдений

В настоящей работе описано проведение серии экспериментов в очистных тупиковых выработках большой протяженности (более 100 м) на одном из рудников ВМКМС для анализа зависимости изменения концентрации горючих и ядовитых газов по пути удаления

вентиляционной струи воздуха от источника газовой выработки (от забоя до устья камеры). Исследования проводились на продуктивных пластах АБ и Кр-II для оценки влияния породного массива разного минерального состава на изменение концентрации газов в выработке.

Общий принцип исследования состоял в отборе проб воздуха и измерении количества проходящего воздуха в нескольких точках по всей длине тупиковой очистной выработки. Все измерения в рамках эксперимента выполнялись во время работы добычного оборудования и при стабильном режиме вентиляции.

Отбор проб воздуха выполнялся для оценки концентрации горючих и токсичных газов в атмосфере горной выработки, а измерение количества воздуха – для определения количества газа и оценки количества утечек вентиляционного трубопровода. Отбор проб воздуха для определения концентрации горючих газов производился «мокрым способом». «Мокрый способ» является традиционным при отборе проб для определения труднорастворимых газов (CH_4 , H_2 , CO , CO_2) [12]. Отбор пробы совершается методом замещения с помощью стеклянной емкости объемом 0,7 дм³, наполненной водой (рис. 1). Для определения концентрации растворимых газовых примесей (H_2S , NO и NO_2) в рудничной атмосфере отбор проб совершается посредством медицинских шприцов емкостью 0,15 дм³. Перед отбором проб внутрь шприца с помощью пипетки вводят 7 см³ поглотительного раствора молибденово-кислого аммония и закрывают прободоотборник заглушкой (рис. 2).

В местах отбора пробы прободоотборник-шприц размещают вертикально, снимают заглушку в виде медицинского шприца. Одним движением поршня вниз отбирают пробу воздуха до деления 0,15 дм³, закрывают прободоотборник заглушкой, помещают в футляр для доставки пробы в лабораторию³.

Замеры проводились согласно методике проведения газовой съемки. В каждой точке отбиралось не менее трех проб воздуха (рис. 3) для определения среднего количества газа, проходящего по выработке. После проведения замеров пробы воздуха в течение 2 ч доставлялись в лабораторию и не позднее 12 ч с момента отбора подвергались анализу.

Анализ отобранных образцов воздуха проводился в лабораторных условиях. Разделение горючих газов CH_4 и H_2 , оксида CO и диоксида CO_2 углерода, содержащихся в отобранных образцах воздуха, производилось хроматографическим методом на приборе «ХРОМОС ГХ-1000». Принцип действия хроматографа заключается в разделении пробы воздуха на отдельные химические компоненты и определении их количества при помощи детектора. Далее при помощи программного обеспечения прибора измерялась объемная доля каждого из компонентов⁴.

³ Лаптев В.Н., Казаков Б.П., Левин Л.Ю., Норина Н.В. и др. Устройство для отбора газовых проб в рудниках на содержание сероводорода. Патент на полезную модель. 2014; Лаптев В.Н., Исаевич А.Г., Норина Н.В. и др. Устройство для непрерывного отбора газо-воздушной смеси за заданный промежуток времени. Патент на полезную модель. 2015.

⁴ Чудин Е.А. Программа для ЭВМ. Программный модуль управления термостатом колонок газового хроматографа.



Рис. 1. Пробоотборник для определения концентрации горючих газов

Анализ массовой концентрации сероводорода H_2S выполнялся фотометрическим методом с реактивом молибдатом аммония с помощью фотоэлектрического колориметра – КФК-3КМ. Такой метод основан на измерении оптической плотности соединения, полученного при поглощении сероводорода из воздуха раствором молибденовокислого аммония [13]. Массовую концентрацию сероводорода определяли по градуированной зависимости «оптическая плотность – массовая концентрация».

Все измерения проводились по аттестованным методикам измерений⁵ с применением средств измерений утвержденного типа, прошедших поверку.

⁵ ФР.1.31.2022.42903 ГСИ. Методика измерений объемной доли кислорода, метана, диоксида углерода и массовой концентрации оксида углерода, сероводорода, оксида азота и диоксида азота в атмосфере горных выработок и определения газообильности по горючим газам в горных выработках и шахте в целом; ФР.1.31.2022.44212 Методика измерений массовой концентрации сероводорода (гидросульфида, водород сульфида) с реактивом молибдатом аммония).

Для проведения экспериментов были выбраны рабочие зоны по разным продуктивным пластам на одном из рудников ВМКМС. Натурные измерения проводились в три этапа: первый этап замеров – по пласту Кр-II, второй и третий – по пласту АБ. Основным условием при выборе рабочих зон для проведения эксперимента была тупиковая выработка большой протяженности – более 100 м. Выбранные рабочие зоны располагались в пределах одного выемочного участка (панели), где велись подготовительные горные работы для отработки нового выемочного блока, чем и обусловлена большая протяженность выработок.

Принцип эксперимента предполагал равномерное и единовременное проведение измерений в нескольких точках по всей длине камеры, как показано на рис. 4.

Первый этап исследований включал в себя серию замеров в рабочей зоне по пласту Кр-II. Основной минеральный состав данного пласта состоит из хлорида калия KCl – 29 % и хлорида натрия $NaCl$ – 66 % [14]. При проведении первого этапа замеров расстояние от устья камеры до забоя составляло 180 м. Комплекс добычного оборудования, действующего в рабочей зоне, включал в себя: проходческий комбайн Урал-20р, бункер-перегрузчик БПС-25 и шахтный самоходный вагон ВС-30. Техническая производительность такого комплекса составляет 6–8 т/мин. Проветривание рабочей зоны осуществлялось с помощью вентилятора местного проветривания ВМЭ-6. Вентилятор располагался на выемочном штреке, воздух к забою доставлялся нагнетательным способом с помощью гибкого вентиляционного става диаметром 500 мм (см. рис. 4). Производительность данного вентилятора с таким диаметром и длиной трубопровода составляет 190–200 м³/мин. Скорость проходки указанным комбайновым комплексом в среднем составляет 30 м/смену. Отбор проб в рабочей зоне производился в третью добычную смену спустя 30 мин после начала работы добычного оборудования непосредственно во время его работы. В пределах камеры выбраны 4 точки для проведения замеров от забоя через каждые 50 м к устью.

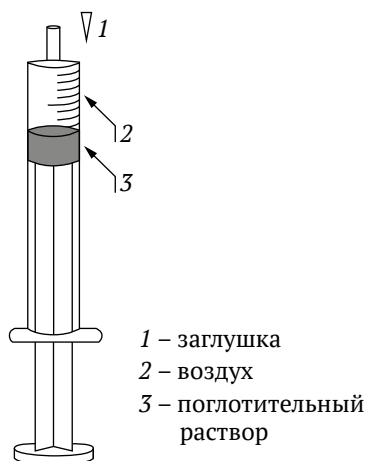


Рис. 2. Пробоотборник для определения концентрации сероводорода H_2S

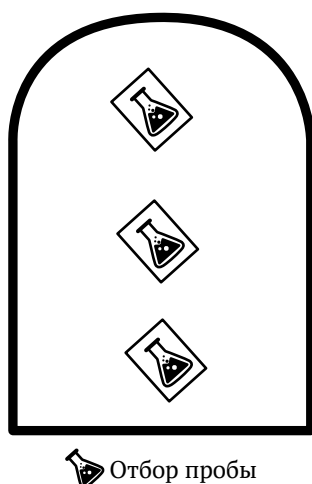


Рис. 3. Способ отбора проб



Рис. 4. Схема проведения замеров по пласту Кр-II

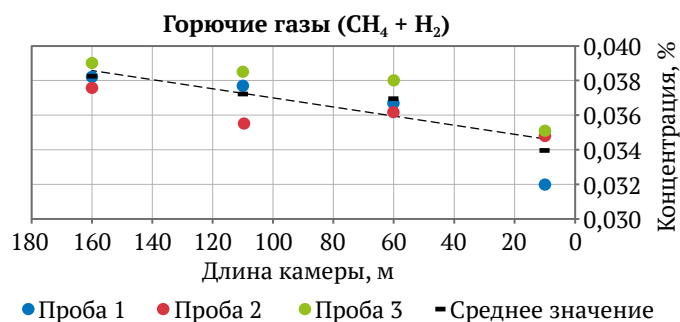


Рис. 5. Концентрация горючего газа по пласту КР-II

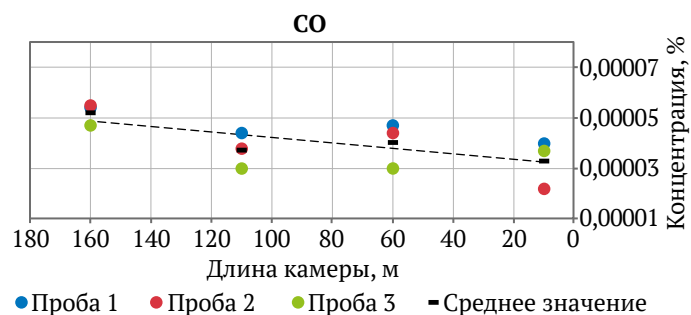


Рис. 6. Концентрация оксида углерода по пласту КР-II

Второй этап эксперимента проводился в тупиковой камере по пласту АБ. Минеральный состав данного продуктивного пласта отличается от минерального состава по пласту КР-II повышенным содержанием хлорида калия KCl – до 39%. Эксперимент проводился в тупиковой горной выработке длиной 130 м. В рабочей зоне в момент проведения замеров находился в работе комбайновый комплекс в составе проходческого комбайна Урал-61, бункера-перегрузателя БП-14 и самоходного вагона ВС-17В. Техническая производительность данного комплекса составляет 3 т/мин. Вентиляция рабочей зоны осуществлялась вентилятором местного проветривания ВМЭ-6 с гибким вентиляционным ставом диаметром 500 мм. Производительность вентилятора в данных условиях работы составит 200–210 м³/мин. Средняя скорость движения данного комплекса – 30 м/смену. В пределах камеры выбрано 5 точек для проведения замеров от забоя через каждые 30–35 м к устью. Замеры проводились во время цикла погрузки самоходного вагона у комбайна.

Этапы замеров по пласту Кр-II и АБ включали в себя отбор проб воздуха для определения концентрации метана CH₄, водорода H₂, оксида углерода СО и кислорода O₂. Кроме того, в местах отбора проб фиксировалось количество проходящего воздуха. Время отбора проб на каждом этапе, не считая подготовки к эксперименту, составило не более 10 мин.

Продуктивный пласт АБ на рудниках ВМКМС в отличие от пласта Кр-II характеризуется склонностью к выделению сероводорода H₂S при его разработке [15]. Поэтому отдельным этапом исследования был произведен отбор проб в камере по пласту АБ на определение сероводорода H₂S. Замеры проводились в пределах того же выемочного блока в другой камере месяцем позже.

Третий этап эксперимента проводился в тупиковой камере длиной 100 м по пласту АБ. Добычное оборудование в пределах рабочей зоны состояло из комбайна Урал-61, бункера-перегрузателя БП-14 и самоходного вагона ВС-17В. Проветривание рабочей зоны осуществлялось вентилятором местного проветривания ВМЭ-6 с гибким вентиляционным ставом диаметром 500 мм, производительностью 205–215 м³/мин. В пределах камеры были выбраны 3 точки для проведения замеров – у забоя, в середине и в устье камеры. Замеры проводились во время цикла погрузки самоходного вагона у комбайна. Серия замеров включала

в себя отбор проб воздуха на определение концентрации сероводорода H₂S, в точках отбора проб фиксировалось количество проходящего воздуха, кроме того, в забое на проходческом комбайне был размещен шахтный газоанализатор (см. рис. 4), который каждые 10 с фиксировал и сохранял значения концентрации сероводорода H₂S. Время отбора проб составило 10 мин. Далее представлены результаты обработки проб по всем этапам эксперимента.

Результаты эксперимента

Анализ проб, отобранных хроматографическим и фотометрическим методом, предоставляет возможность оценить изменение концентрации горючих и токсичных газов по пути движения исходящей струи в камере от забоя до устья. Отбор трех проб в каждой точке позволяет оценить величину отклонения полученных данных и определить среднее значение концентрации. Обработка проб проводилась в лабораторных условиях с соблюдением всех необходимых климатических параметров. В соответствии с методикой анализ концентрации горючих газов проводился при раздельном определении концентрации метана и водорода с последующим их суммированием, %:

$$\Sigma = C_{\text{CH}_4} + C_{\text{H}_2}, \quad (1)$$

где С – концентрация представленного компонента, %.

Полученные результаты концентраций исследуемых компонентов представлены в виде точечных диаграмм. По средним значениям концентрации каждого компонента нанесены линии тренда.

Так, на рис. 5 и 6 представлены значения концентраций горючего газа (CH₄ + H₂) и оксида углерода СО, полученные при анализе образцов, отобранных по всей длине камеры по пласту Кр-II в рамках первого этапа эксперимента.

Согласно полученным результатам в рабочей зоне по пласту Кр-II наблюдается процесс снижения объемной доли исследуемых компонентов в воздухе по длине от забоя к устью камеры. За 150 м пути движения исходящей струи воздуха средняя концентрация горючих газов (CH₄ + H₂) снизилась на 10%, а средняя концентрация оксида углерода СО снизилась на 17%.

Полученные значения концентрации горючих газов и оксида углерода при анализе проб воздуха, отобранных в рамках второго этапа эксперимента по пласту АБ, представлены на рис. 7 и 8.

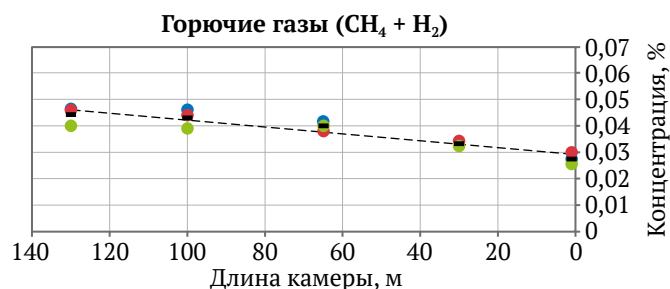


Рис. 7. Концентрация горючего газа по пласту АБ

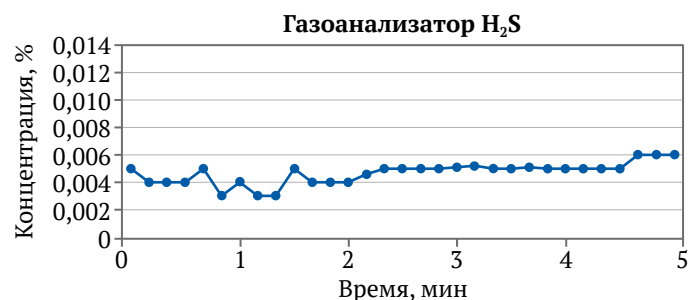


Рис. 9. Показания газоанализатора в забое

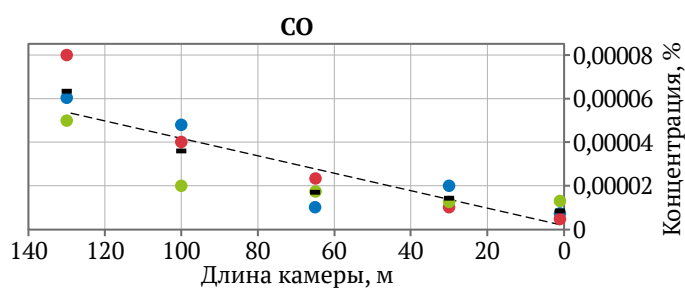


Рис. 8. Концентрация оксида углерода по пласту АБ

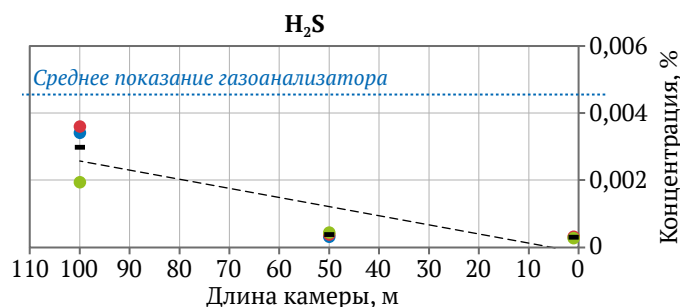


Рис. 10. Концентрация сероводорода по пласту АБ

Таблица 1
Снижение концентрации газа в очистной камере

Пласт	Снижение концентрации за 100 м, %		
	горючие газы (CH ₄ + H ₂)	оксид углерода CO	сероводород H ₂ S
Пласт КР-II	9	12	–
Пласт АБ	35	76	90

Результаты обработки проб, отобранных в рабочей зоне по пласту АБ, указывают на процесс снижения концентрации газовых примесей в атмосфере камеры от забоя к устью. За 130 м пути движения исходящей струи средняя концентрация горючих газов (CH₄ + H₂) в воздухе снизилась на 37 %, а концентрация оксида углерода CO снизилась на 88 %.

Отбор проб по пласту АБ в рамках третьего этапа эксперимента проводился совместно с непрерывной фиксацией концентрации сероводорода H₂S в забое с помощью шахтного газоанализатора. Показания газоанализатора в промежутки времени, когда происходил отбор проб воздуха, представлены в виде графика на рис. 9.

Средний показатель значения концентрации сероводорода H₂S, зафиксированный газоанализатором у проходческого комбайна, где преимущественно выделяется газ из массива, составляет 0,0047 %. Значения концентрации сероводорода H₂S, полученные в результате обработки проб воздуха, отобранных в рамках третьего этапа эксперимента по пласту АБ, представлены на рис. 10.

Результаты обработки проб воздуха, отобранных в рабочей зоне пласта АБ, указывают на снижение

концентрации сероводорода по пути движения исходящей струи от забоя к устью камеры. За 100 м пути движения исходящей струи средняя концентрация сероводорода в воздухе снизилась на 90 %.

Анализ результатов

Результаты замеров, проведенных в рамках данного исследования, отчетливо демонстрируют процесс снижения концентрации газовых примесей в воздухе протяженных рабочих зон по пути движения исходящей струи от забоя (источника выделения газа) до устья тупиковой камеры. Отбор проб в рабочих зонах продуктивных пластов КР-II и АБ позволяет оценить величину влияния массива разного минерального состава на поглощение газовых примесей из атмосферы тупиковой выработки [16].

Полученные результаты показывают, что процесс снижения концентрации газовых примесей в атмосфере рабочей зоны по пласту АБ протекает более интенсивно, чем по пласту КР-II, в условиях одинаковых длин тупиковых камер. В табл. 1 представлена доля снижения концентрации газовых примесей по разным пластам за 100 м пути вентиляционной струи в камере. Отрезок пути, равный 100 м, принят для приведения к единому образцу условий для каждого этапа исследования.

Снижение концентрации газовых примесей по мере движения воздуха от забоя к устью камеры можно связать не только с поглощением газообразных примесей массивом горных пород⁶ [17], но и с разбавлением исходящей струи утечками свежего воздуха из вентиляционного трубопровода в атмосферу камеры.

⁶ Горбатенко Ю.А. Адсорбция примесей токсичного газа из загрязненного воздуха. 2014.



Оценить, насколько значительно сорбционные свойства массива влияют на снижение концентрации газовых примесей в исходящей струе, возможно только при определении количества утечек вентиляционного трубопровода на исследуемом отрезке [18].

В рамках каждого этапа исследования проводились замеры с целью определения количества утечек из вентиляционного трубопровода. Так, в точках отбора проб производился замер количества проходящего воздуха с помощью рудничного крыльчатого анемометра. Замеры скорости воздуха в рамках данного исследования не показали значительной разницы между точками, выбранными в пределах камеры. Количество воздуха в каждой точке замеров варьировалось от 200 до 215 м³/с с учетом допускаемой паспортной погрешности используемого анемометра на данных скоростях $+(0,03 + 0,02V)$, где V – численное значение измеряемой скорости, м/с.

В связи с невозможностью измерения количества утечек из вентиляционного трубопровода на исследуемом отрезке камеры в рамках данного исследования количество утечек воздуха принималось по нормативным показателям утечек вентиляционного трубопровода, приведенным в действующей нормативной документации, используемой на рудниках ВМКМС в части расчета количества требуемого воздуха для проветривания тупиковых камер⁷. Нормативный показатель утечек предполагает максимально возможное количество утечек из вентиляционного трубопровода без нарушений его целостности и при номинальной производительности вентилятора местного проветривания. В нормальных условиях для гибкого вентиляционного трубопровода длиной 100 м коэффициент утечек принимается равным 1,07. Следовательно, на исследуемых принятых к учету отрезках тупиковых камер по пластам Кр-II и АБ количество воздуха у забоя принимается на 7 % ниже, чем количество воздуха, проходящее через устье камеры.

Известные значения количества воздуха позволяют пересчитать зафиксированные значения концентрации газа, %, в количество газа, проходящего в исследуемых точках, м³/мин. При оценке величины изменения количества газа, м³/мин, проходящего по выработке, исключается фактор влияния утечек воздуха из вентиляционного трубопровода на количество вредных примесей по пути движения вентиляционной струи (от забоя до устья камеры). Следовательно, изменение количества газа, проходящего по выработке, говорит о влиянии свойств массива горных пород, прилегающего к выработке, на газовый баланс в пределах тупиковых камер рудников ВМКМС.

В табл. 2 представлены изменение среднего количества газовых примесей, проходящих по выработке, и величина сорбционных свойств массива по каждому пласту, определенная в рамках эксперимента.

Представленные в табл. 2 данные указывают, что количество газа в тупиковых камерах снижается от забоя к устью. Наиболее интенсивный процесс сни-

жения концентрации газовых примесей протекает в тупиковых камерах по пласту АБ, что подтверждают лабораторные эксперименты [7], где более насыщенный минеральный состав силвинита KCl оказывает преимущественное влияние на сорбцию газовых примесей.

Таблица 2

Снижение количества газа в исследуемых рабочих зонах

Пласт	Количество газа, проходящего через точку замера, м³/мин		Доля снижения, %
	Тупик	Устье	
Пласт Кр-II (KCl 29%)			
Горючие газы (CH ₄ +H ₂)	0,07099	0,06895	3*
Оксид углерода CO	0,000072	0,000067	7
Пласт АБ (KCl 39%)			
Горючие газы (CH ₄ +H ₂)	0,08170	0,05613	31
Оксид углерода CO	0,000068	0,000017	75
Сероводород H ₂ S	0,00566	0,00059	88

* в пределах совокупной погрешности методик измерений.

Весьма незначительное снижение количества горючих газов и оксида углерода по пласту Кр-II не позволяет сделать четких выводов о сорбционных свойствах массива по данному пласту. Незначительное изменение показателей может быть обусловлено погрешностью используемого оборудования и методики измерения. Отследить величину снижения газовых примесей по пласту Кр-II возможно при увеличении длины исследуемой выработки.

Заключение

В рамках работы была проведена серия экспериментальных наблюдений в условиях подземных тупиковых выработок калийного рудника по продуктивным пластам Кр-II и АБ. По результатам проведенных экспериментов выполнен анализ воздействия сорбционных свойств калийных солей на газовую обстановку в пределах тупиковых рабочих зон. Проведена оценка влияния утечек воздуха из вентиляционных трубопроводов на уменьшение концентрации газообразных примесей.

В ходе проведенных экспериментальных исследований было выявлено, что в протяженных тупиковых камерах продуктивного пласта АБ (длиной 100 м и более) наблюдается снижение концентрации газовых примесей вдоль выработки в направлении от забоя к устью. Полученные данные согласуются с результатами предыдущих лабораторных экспериментов [9], в которых было показано, что калийная соль способна абсорбировать оксид углерода CO и горючие газы, такие как водород H₂ и метан CH₄. Кроме того, в рамках этого исследования были проведены эксперименты на продуктивном пласте АБ с целью изучения динамики изменения концентрации выделяющегося при отбойке руды сероводорода H₂S по мере продвижения вентиляционной струи от забоя до устья камеры. Ре-

⁷ Временная инструкция по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудных шахт. 1983.



зультаты экспериментальных исследований показали, что средняя эффективность сорбции силъвинита по пласту АБ с концентрацией KCl 39 % при прохождении вентиляционной струи на расстояние 100 м от тупика к устью тупиковой горной выработки составила 31 % для горючих газов – водорода H_2 и метана CH_4 , 75 % – для оксида углерода CO и 88 % – для сероводорода H_2S . При проведении исследований учитывались факторы, которые могут влиять на уменьшение концентрации газа в рабочей зоне. Коэффициент утечки вентиляционного трубопровода был учтен при переходе от концентрации газообразных примесей к объему газа, проходящего через контрольные точки измерений.

Исследование представляет собой продолжение работы по изучению сорбционных свойств калийных солей в отношении поглощения горючих и токсичных

газовых компонентов из рудничной атмосферы. Наблюдения за влиянием сорбционных характеристик калийных солей на газовый состав атмосферы в протяженных тупиковых выработках калийного рудника ВМКМС проводились как продолжение серии лабораторных экспериментов [7]. Результаты данной работы будут способствовать дальнейшему развитию методологии оценки факторов, влияющих на состав рудничной атмосферы в пределах тупиковых выработок, а также послужат основанием для разработки методики проведения газовых съемок в рабочих зонах калийных рудников. В будущем планируется масштабировать проведенные исследования на всех рудниках ВМКМС для накопления статистических данных и апробации усовершенствованной методики проведения газовых съемок на калийных рудниках.

Список литературы / References

1. Кузьминых Е.Г., Левин Л.Ю., Мальцев С.В. Распределение продуктов выхлопных газов техники с двигателями внутреннего сгорания в шахтной вентиляционной сети. *Горное эхо*. 2023;(2):96–103. <https://doi.org/10.7242/echo.2023.2.17>
Kuzminykh E.G., Levin L.Yu., Maltsev S.V. Distribution of exhaust gas products from machinery with internal combustion engines through the shaft ventilation system. *Gornoye Ekho*. 2023;(2):96–103. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2023.2.17>
2. Трушкова Н.А. Исследование газового состава рудничного воздуха для оценки возможности применения рециркуляционного проветривания. *Горное эхо*. 2019;(3):84–87. <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.23>
Trushkova N.A. Investigation of the gas composition of mine air to assess the possibility of using recirculating ventilation. *Gornoye Ekho*. 2019;(3):84–87. (In Russ.) <https://doi.org/10.7242/echo.2019.3.23>
3. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. *Аэрология калийных рудников*. Свердловск: АН СССР; 1990. С. 119–126. Medvedev I.I., Krasnoshtein A.E. *Aerology of potash mines*. Sverdlovsk: Academy of Sciences of the USSR; 1990. Pp. 119–126. (In Russ.)
4. Баранников В.Г., Красноштейн А.Е., Папулов Л.М. и др. *Спелеотерапия в калийном руднике*. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН; 1996. Т. 173. Barannikov V.G., Krasnoshtein A.E., Papulov L.M. et al. *Speleotherapy in a potash mine*. Yekaterinburg: Publishing House of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences; 1996. Vol. 173. (In Russ.)
5. Puławska A., Manecki M., Flasz M. et al. Origin, distribution, and perspective health benefits of particulate matter in the air of underground salt mine: a case study from Bochnia, Poland. *Environmental Geochemistry and Health*. 2021;43(9):3533–3556. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-00832-2>
6. Calin M., Zoran M., Calin M. Radon levels assessment in some Northern Romanian salt mines. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 2012;293(2):565–572. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1686-1>
7. Yao N., Chen J., Feng R. et al. Mechanistic understanding of adsorption of low concentrations of N-nitrosodiethylamine in water by functional MIL-96: experiments and theoretical calculations. *Chemical Engineering Journal*. 2022;451(3):138761. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.138761>
8. Yang D., Peng X., Peng Q. et al. Probing the interfacial forces and surface interaction mechanisms in petroleum production processes. *Engineering*. 2022;18:49–61. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.06.012>
9. Суханов А.Е., Бруев Н.А., Газизуллин Р.Р., Стариков А.Н. Исследование сорбционных свойств солей на примере газов, содержащихся в атмосфере калийных рудников. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2023;(1):495–507. <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-1-1-495-507>
Sukhanov A.E., Bruev N.A., Gazizullin R.R., Starikov A.N. Research of sorption properties of salt on the example of gases contained in the atmosphere of potash mines. *Izvestiya Tuls'kogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2023;(1):495–507. (In Russ.) <https://doi.org/10.46689/2218-5194-2023-1-1-495-507>
10. Кузнецова Ю.Л. Эволюция размера растворимой аэрозольной частицы во влажном воздухе. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2022;15(1):31–44. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.1.3>
Kuznetsova Y.L. Size evolution of a soluble aerosol particle in air. *Computational Continuum Mechanics*. 2022;15(1):31–44. <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2022.15.1.3>
11. Баранников В.Г., Черешнев В.А. Гигиеническая оценка процессов самоочищения воздуха в калийном руднике. В: *Проблемы безопасности при эксплуатации месторождений полезных ископаемых в зонах градопромышленных агломераций: тезисы докладов Международного симпозиума*. М., Пермь; 1995. С. 12–13. Barannikov V.G., Chereshevnev V.A. Hygienic assessment of air self-purification processes in a potash mine. In: *Safety problems in the exploitation of mineral deposits in urban agglomerations: Abstracts of the International Symposium*. Moscow, Perm: 1995. Pp. 12–13. (In Russ.)



12. Исаевич А.Г., Старилов А.Н., Мальцев С.В. Совершенствование метода отбора проб воздуха для определения относительной газообильности горючих газов в рудничной атмосфере. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2021;(4):143–153. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_143
Isaevich A.G., Starikov A.N., Maltsev S.V. Improvement of air sampling method to determine relative concentration of combustion gases in mine air. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2021;(4):143–153. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2021_4_0_143
13. Норина Н.В., Исаевич А.Г. Разработка методов и технических средств нейтрализации серосодержащих соединений в атмосфере калийных рудников. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2021;(4):550–557.
Norina N.V., Isaevich A.G. Methods and technical means of neutralization sulfur-containing gases in the atmosphere of potassium mines. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2021;(4):550–557. (In Russ.)
14. Сметанников А.Ф., Филиппов В.Н. Некоторые особенности минерального состава соляных пород и продуктов их переработки (на примере Верхнекамского месторождения солей). *Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского*. 2010;13:99–113.
Smetannikov A.F., Filippov V.N. Some features of the mineral composition of salt rocks and their processed products using the example of Verkhnekamskoe salt deposit. *Problems of Mineralogy, Petrography and Metallogeny. Scientific Readings in Memory of P.N. Chirvinsky*. 2010;13:99–113. (In Russ.)
15. Земсков А.Н., Лискова М.Ю. Особенности формирования компонентного состава газов калийных месторождений. *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2019;(2):88–97.
Zemskov A.N., Liskova M.Yu. Features formation of component composition of gases of potash fields. *Izvestiya Tulsogo Gosudarstvennogo Universiteta. Nauki o Zemle*. 2019;(2):88–97. (In Russ.)
16. Газизуллин Р.Р., Исаевич А.Г., Левин Л.Ю. Численное моделирование процессов выноса вредных примесей рудничной атмосферы при проветривании тупиковых выработок различными способами. *Научные исследования и инновации*. 2011;5(2):127–129.
Gazizullin R.R., Isaevich A.G., Levin L.Yu. Numerical modeling of the processes for removing harmful impurities from mine atmosphere during ventilation of dead-end workings using various methods. *Scientific Researches and Innovations*. 2011;5(2):127–129. (In Russ.)
17. Красноштейн А.Е. *Физико-химический механизм в процессе адсорбции ядовитых примесей рудничной атмосферы калийными солями*. Пермь: Пермский политехнический ин-т.; 1977.
Krasnoshtein A.E. *Physico-chemical mechanisms in the process of adsorption of toxic impurities from the mine atmosphere using potash salts*. Perm: Perm Polytechnic Institute; 1977. (In Russ.)
18. Zhu X., Wen H. Numerical simulation study on the influence of air leakage on oxygen concentration in goafs of fully mechanized caving mining with shallow buried and large mining height. *Frontiers in Earth Science*. 2023;11:1138925. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1138925>

Информация об авторах

Алексей Николаевич Старилов – аспирант, Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; инженер отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0000-0001-9352-5612](https://orcid.org/0000-0001-9352-5612); e-mail starikov4488@mail.ru

Станислав Владимирович Мальцев – кандидат технических наук, заведующий сектором рудничной вентиляции отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-9887-1455](https://orcid.org/0009-0002-9887-1455)

Андрей Евгеньевич Суханов – аспирант, младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики, Горный институт УрО РАН, г. Пермь, Российская Федерация; ORCID [0009-0002-7960-8344](https://orcid.org/0009-0002-7960-8344); e-mail asukhanov@aerologist.ru

Information about the authors

Alexey N. Starikov – PhD-Student, Perm Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; Engineer of the Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0000-0001-9352-5612](https://orcid.org/0000-0001-9352-5612); e-mail starikov4488@mail.ru

Stanislav V. Maltsev – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Mine Ventilation Sector of the Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0002-9887-1455](https://orcid.org/0009-0002-9887-1455)

Andrey E. Sukhanov – PhD-Student, Junior Researcher at the Department of Aerology and Thermophysics, Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation; ORCID [0009-0002-7960-8344](https://orcid.org/0009-0002-7960-8344); e-mail asukhanov@aerologist.ru

Поступила в редакцию 22.01.2024
Поступила после рецензирования 16.09.2024
Принята к публикации 17.09.2024

Received 22.01.2024
Revised 16.09.2024
Accepted 17.09.2024