

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2023.2.15

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ РАБОЧИХ ЗОН С УЧЕТОМ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ РАСЧЕТА КОЛИЧЕСТВА ВОЗДУХА

А.В. Зайцев, Н.А. Трушкова
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация. В работе развита математическая модель стационарного газораспределения в рециркуляционном контуре, содержащем рабочие зоны с источниками газовой выделенности и без них с требованием обеспечения минимально допустимой скорости воздуха. Показано, что с точки зрения рециркуляционного проветривания рабочие зоны без газовой выделенности идентичны внутренним утечкам воздуха, а количество воздуха, подаваемое на их проветривание, может быть эффективно использовано для повышения эффективности применения рециркуляции. Для этого целесообразна система управления проветриванием рабочих зон, позволяющая перераспределять количество воздуха между рабочими зонами в рециркуляционном контуре. Приведены методические основы расчета количества воздуха при применении рециркуляционного проветривания.

Ключевые слова: горная выработка, рудничная вентиляция, математическое моделирование, газораспределение, внутренние утечки воздуха, рециркуляция, газовыделение, расчет количества воздуха.

Введение

В связи с интенсивным развитием горнодобывающих предприятий остро стоит вопрос поиска эффективных технологий обеспечения проветривания все большего количества подземных рабочих зон. При этом современные предприятия зачастую имеют разветвленную развитую сеть горных выработок, характеризуются значительными внутренними утечками, но при этом имеют ограничения по подаче большего количества свежего воздуха с поверхности. В этих условиях одним из перспективных способов повышения эффективности систем вентиляции подземных рудников, уже зарекомендовавших себя на практике, является применение систем частичного повторного использования воздуха на основе организации рециркуляционного проветривания [1-3]. Рециркуляционное проветривание основано на повторном использовании исходящей струи воздуха в случае, если параметры воздушной среды удовлетворяют установленным нормативам.

При этом, рассматривая традиционные факторы газо-, тепло- и пылевыведения, по которым рассчитывается проветривание подземных рабочих зон, только фактор газовой выделенности представляет опасность с точки зрения накопления и ухудшения качества подаваемого воздуха. Так, формирование теплового режима вентиляционных выработок характеризуется в основном теплообменом воздуха с окружающим массивом горных пород, что приводит к отведению тепловыделений из рабочих зон в окружающий массив. Как правило, на расстоянии от 1,5 километров и более температура воздуха исходящей струи уже не отличается от температуры воздуха, подаваемого на проветривание. На этом основан один из горнотехнических способов регулирования теплового режима очистных выработок на основе рециркуляционного проветривания [4]. Аналогично фактор пыли характеризуется тем, что при движе-

нии по вентиляционным выработкам происходит процесс осаждения пыли, особенно явно выраженный при обводненности горных выработок. Таким образом, через некоторое расстояние исходящая струя имеет низкие концентрации пыли и может быть направлена на повторное использование [5]. Далее, такой фактор расчета количества воздуха, как обеспечение минимальной скорости движения воздушной среды, также не приводит к увеличению концентрации газа, что создает предпосылки для использования этого воздуха для повторного проветривания рабочих зон с газовыделениями.

Несмотря на большой объем работ, выполненных в области рециркуляционного проветривания [1-3, 6], отсутствуют исследования рециркуляционного проветривания рабочих зон при действии различных факторов расчета количества воздуха. В данной работе на основе ранее разработанной модели делается попытка анализа газораспределения в рециркуляционном контуре, включающем рабочие зоны с различными факторами, определяющими требуемое количество воздуха.

Математическая модель

Решение поставленной задачи осуществляется на основе совершенствования математической модели газового баланса в рециркуляционном контуре, представленной в [7]. Для этого в модели рассматривается не одна рабочая зона с источником газовой выделенности, а две рабочие зоны, в одной из которых действует газовый фактор (присутствует источник газовой выделенности), а в другой есть требование по поддержанию минимально необходимого расхода воздуха (фактор минимальной скорости воздуха). Схема представлена на рисунке 1.

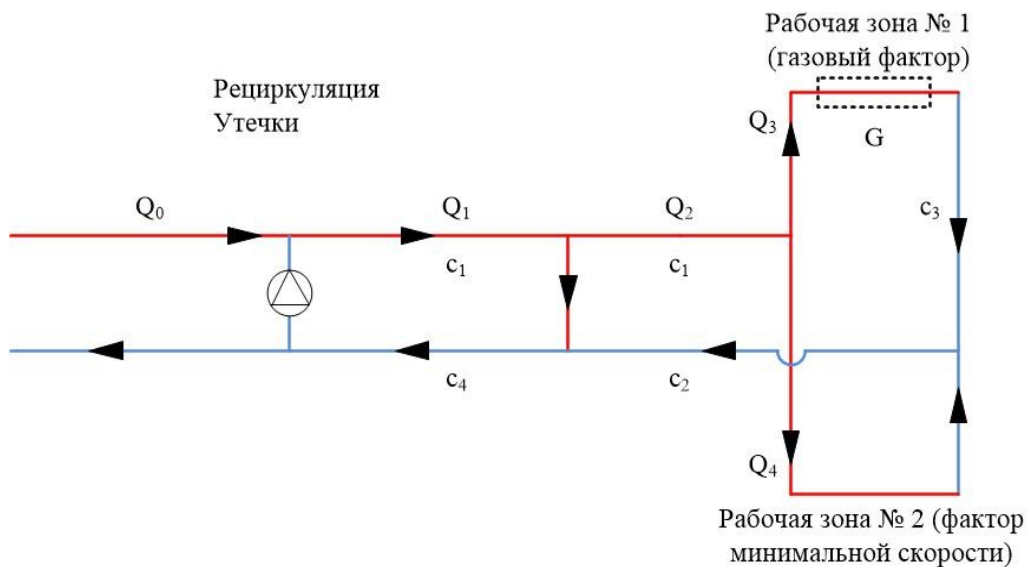


Рис. 1. Расчетная схема рециркуляционного контура с рабочими зонами разного типа

Считается, что распределение подачи свежего воздуха и интенсивности рециркуляционного проветривания не изменяется. Также предполагается, что концентрации газов малы, поэтому объемный расход воздуха в ветви определяется только воздушной средой. Для удобства вводятся следующие наименования рабочих зон: рабочая зона № 1 с действующим фактором газовой выделенности и рабочая зона № 2 с фактором минимального расхода воздуха.

Система уравнений, описывающая распределение газа в такой сети, будет иметь вид:

$$\begin{cases} c_1 \cdot Q_1 - c_4 \cdot (Q_1 - Q_0) = 0 \\ c_3 - c_1 - \frac{G}{Q_3} = 0 \\ c_3 \cdot Q_3 + c_1 \cdot Q_4 - c_2 \cdot Q_2 = 0 \\ c_1 \cdot (Q_1 - Q_2) + c_2 \cdot Q_2 - c_4 \cdot Q_1 = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где c_1 – концентрация газа в свежей струе после рециркуляционной сбойки, $\text{м}^3/\text{м}^3$, c_2 – концентрация в исходящей струе на выходе из рабочих зон, $\text{м}^3/\text{м}^3$, c_3 – концентрация в исходящей струе рабочей зоны № 1, $\text{м}^3/\text{м}^3$, c_4 – концентрация газа в исходящей струе после разбавления утечками воздуха, $\text{м}^3/\text{м}^3$, Q_0 – расход свежего воздуха, поступающего в рециркуляционный контур, $\text{м}^3/\text{с}$, Q_1 – расход воздуха в рециркуляционном контуре, $\text{м}^3/\text{с}$, Q_2 – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочих зон, $\text{м}^3/\text{с}$, Q_4 – расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны № 2, $\text{м}^3/\text{с}$; G – газообильность рабочей зоны № 1, $\text{м}^3/\text{с}$.

Решая приведенную систему уравнений (1) относительно искомым величин концентраций газа, получим следующее решение

$$\begin{aligned} c_1 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} \\ c_2 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_3 + Q_4}, \\ c_3 &= G \cdot \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1 \cdot Q_0} + \frac{G}{Q_3} \\ c_4 &= \frac{G}{Q_0} \end{aligned} \quad (2)$$

Для удобства анализа введем коэффициенты коэффициент утечек $K_{\text{ут}}$, рециркуляции $K_{\text{рец}}$ и коэффициент распределения воздуха между рабочими зонами

$$\begin{aligned} K_{\text{ут}} &= \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \\ K_{\text{рец}} &= \frac{Q_1 - Q_0}{Q_1}, \\ K_{\text{рз}} &= \frac{Q_3}{Q_2} \end{aligned} \quad (3)$$

С учетом введенных обозначений полученные решения для концентраций газа можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ут}})}{(1 - K_{\text{ут}})} \cdot \frac{G}{Q_0}, \\ c_3 &= K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{\text{рз}} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0} \end{aligned} \quad (4)$$

Из полученного решения концентрации газов в исходящей струе рабочих зон определяются следующими выражениями:

$$c_{P31} = K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{P3} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0}, \quad (5)$$

$$c_{P32} = K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0}$$

Из вида полученных выражений следует, что концентрация газа на входе в рабочие зоны зависит только от суммарного газовыделения внутри рециркуляционного контура, количества свежего воздуха и коэффициента рециркуляции. В рабочей зоне с отсутствующим газовыделением концентрация газа не меняется. В рабочей зоне с газовыделением наблюдается ее прирост в зависимости от количества подаваемого в нее воздуха. Это количество определяется общим объемом свежего воздуха, коэффициентами рециркуляции и утечек, а также распределением воздуха между рабочими зонами.

Полученные выражения позволяют определить расчетные количества воздуха исходя из условий, что в рабочей зоне с фактором газовыделения не должно быть превышения концентрации газов на исходящей струе, а в рабочей зоне с фактором минимальной скорости должен обеспечиваться минимальный расход. То есть должны выполняться условия:

$$K_{\text{рец}} \cdot \frac{G}{Q_0} + \frac{(1 - K_{\text{рец}}) \cdot G}{K_{P3} \cdot (1 - K_{\text{ут}}) \cdot Q_0} \leq c_{\text{ПДК}}, \quad (6)$$

$$Q_4 \geq Q_{\text{min}}$$

Анализ рециркуляционного проветривания рабочих зон

На основе выражений (4) и (6) возможно провести анализ изменения газораспределения в рабочих зонах при различных вариантах перераспределения воздуха, утечках и рециркуляции. Для расчета приняты следующие исходные данные: мощность газовыделения в рабочей зоне № 1 составляет 1 м³/с, предельно допустимая концентрация – 2%, минимально необходимый расход в рабочей зоне № 2 – 50 м³/с.

Далее для анализа рассмотрены следующие варианты распределения расходов для обеспечения заданных условий проветривания рабочих зон, при которых не наблюдается превышения предельно допустимой концентрации газов и обеспечивается расход не меньше минимального:

- 1) отсутствуют утечки воздуха и рециркуляционное проветривание;
- 2) присутствуют утечки воздуха в количестве 50%, но отсутствует рециркуляционное проветривание;
- 3) присутствуют утечки воздуха в количестве 50%, но есть рециркуляционное проветривание с коэффициентом 50%, при этом нет возможности перераспределения воздуха между рабочими зонами; регулирование осуществляется только за счет изменения подачи свежего воздуха;
- 4) присутствуют утечки воздуха в количестве 50%, но есть возможность регулировать количество рециркулируемого воздуха и перераспределение между рабочими зонами.

Результаты расчетов по данным вариантам представлены в таблице 1.

Таблица 1

Внутренние утечки воздуха в подземных рудниках

Параметр	Вариант № 1	Вариант № 2	Вариант № 3	Вариант № 4
Расход свежего воздуха,	100	200	125	110
Расход рециркуляции, м ³ /с	0	0	125	125
Коэффициент рециркуляции, %	0	0	50	53
Коэффициент утечек, %	0	50	50	50
Объем утечек, м ³ /с	0	100	125	117,5
Концентрация на входе в рабочие зоны, %	0	0	0,4	0,5
Рабочая зона № 1				
Расход воздуха, м ³ /с	50	50	62,5	66,97
Расчетный расход воздуха, м ³ /с	50	50	62,5	66,5
Мощность выделения газа, м ³ /с	1	1	1	1
Концентрация на выходе	2	2	2	1,98
Рабочая зона № 2				
Расход воздуха, м ³ /с	50	50	62,5	50,53
Расчетный расход воздуха, м ³ /с	50	50	50	50
Концентрация на выходе %	0	0	0,4	0,4
Распределение между рабочими зонами	0,5	0,5	0,5	0,57

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что рабочие зоны несимметричны относительно влияния рециркуляционного проветривания. При возникновении рециркуляционного контура появляется возможность снизить подачу свежего воздуха за счет той части расходов, которая не участвует в разбавлении вредных примесей от источников. При этом подача воздуха на эту рабочую зону также увеличивается и возникает ситуация с подачей избыточного количества воздуха в эту рабочую зону. Таким образом, для большей эффективности рециркуляционного проветривания целесообразно перераспределить количества воздуха между рабочими зонами и большую часть подать на рабочую зону с рециркуляцией. Поэтому возникает задача поиска необходимого распределения расходов воздуха между рабочей зоной при действии различных фак-

торов. Для этого разрешим неравенство (6) относительно коэффициента распределения воздуха между рабочими зонами:

$$K_{PЗ} = \frac{G}{\left(c_{ПДК} - K_{рец} \cdot \frac{G}{Q_0}\right) Q_{min}}, \quad (7)$$

Можно заметить, что полученное выражение есть отношение расчетных количеств воздуха по различным факторам с учетом того факта, что за счет рециркуляции воздух, подаваемый на проветривание рабочих зон, имеет начальную концентрацию газов.

Также можно отметить, что расход воздуха, проходящий через рабочую зону № 2, не участвует в разбавлении газов от источника непосредственно и с точки зрения газораспределения идентичен утечкам воздуха на схеме. В связи с этим для определения возможности снижения подачи свежего воздуха необходимо считать суммарное количество воздуха, не проходящего через источники газовой выделений.

Полученные результаты можно расширить на общий случай, когда имеются несколько обособленно проветриваемых рабочих зон внутри рециркуляционного контура. У каждой рабочей зоны есть газообильность и минимально требуемое количество воздуха. Кроме того, есть общие утечки воздуха в пределах контура.

В таком случае полученное решение (4) и (5) будет иметь вид:

$$\begin{aligned} c_1 &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} \\ c_2 &= \frac{(1 - K_{рец} \cdot K_{ут}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{(1 - K_{ут}) \cdot Q_0} \\ c_3 &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} + \frac{(1 - K_{рец}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{K_{PЗ} \cdot (1 - K_{ут}) \cdot Q_0} \\ c_{PЗi} &= K_{рец} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N G_i}{Q_0} + \frac{(1 - K_{рец}) \cdot G_i}{K_{PЗi} \cdot (1 - K_{ут}) \cdot Q_0} \end{aligned} \quad (8)$$

где $K_{PЗi}$ – доля воздуха, поступающего на проветривание i -ой рабочей зоны.

Методика определения параметров рециркуляционного проветривания рабочих зон будет иметь следующий вид.

На начальном этапе в зависимости от общего количества газовой выделений в рабочих зонах рассчитывается минимально требуемое количество воздуха из условия недопустимости превышения предельно допустимой концентрации на общей исходящей струе, то есть

$$Q_0 = \frac{(1 - K_{рец} \cdot K_{эф}) \cdot \sum_{i=1}^N G_i}{(1 - K_{эф}) \cdot c_{ПДК}}, \quad (9)$$

Важно отметить, что в выражении использован эффективный коэффициент утечек $K_{эф}$, учитывающий не только тот объем воздуха, который не доходит до рабочих зон, но и воздух, проветривающий рабочие зоны, но не участвующий в разжижении газовых примесей

$$K_{\text{эф}} = \frac{Q_1 - Q_2 - \sum_{i=1}^N Q_{\text{min}}}{Q_1}, \quad (10)$$

При этом в каждую рабочую зону по газовому фактору должна обеспечиваться подача количества воздуха в объеме не менее

$$Q_{\text{рз}i} = \frac{G_i}{c_{\text{ПДК}} \cdot (1 - K_{\text{ут}})}, \quad (11)$$

А по фактору минимальной скорости количество воздуха определяется аналогично тому, как это принято без учета рециркуляции

$$Q_{\text{рз}i} = S_i \cdot v_{\text{min}}, \quad (12)$$

Также необходимо отметить, каким образом следует определять коэффициент рециркуляции в выражении (9). Поскольку было установлено, что при увеличении коэффициента рециркуляции не происходит увеличение максимальных концентраций газа в сети горных выработок, фактор газовыделения в непосредственном виде не ограничивает коэффициент рециркуляции. С другой стороны, поскольку источник тяги в рециркуляционном контуре работает в параллели с вентиляторными установками общешахтного проветривания, увеличение его напора и интенсивности рециркуляции может привести к снижению подачи свежего воздуха к контуру, что создает риск создания потери устойчивости проветривания контура в целом вплоть до прекращения подачи свежего воздуха. Это создает риск неконтролируемой рециркуляции и накопления газовой примеси в контуре [5].

Таким образом, коэффициент рециркуляции должен быть ограничен из соображений обеспечения устойчивой подачи свежего воздуха к рециркуляционному контуру.

Выводы

В работе развита модель газораспределения в рециркуляционном контуре при наличии множества рабочих зон с различными факторами проветривания. С ее помощью выполнен анализ требуемых расходов воздуха, подаваемых в рабочие зоны с различными факторами, при задействовании рециркуляционного проветривания. По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- рециркуляционное проветривание оказывает влияние только на рабочие зоны с наличием фактором газовыделения; факторы обеспечения минимальной скорости движения воздуха, температуры и пыли не зависят от коэффициента рециркуляции и за счет этого обеспечивают повышение эффективности применения рециркуляционного проветривания;
- количества воздуха, подаваемые в рабочие зоны, но не задействованные в разжижении газовых примесей, с точки зрения рециркуляционного проветривания идентичны внутренним утечкам воздуха, что позволяет повышать использование их при организации рециркуляционного проветривания;
- повышение эффективности применения рециркуляционного проветривания может быть достигнуто за счет наличия системы управления проветриванием рабочих зон внутри рециркуляционного контура, позволяющей перераспределять большую часть рециркулируемого воздуха на проветривание рабочих зон с газовыделениями.

Таким образом, эффективность рециркуляционного проветривания может быть увеличена за счет задействования объема воздуха, проходящего через рабочие зоны, но не участвующего в разжижении газовых примесей.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке
Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000396-6).*

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников / УрО РАН. – Екатеринбург, 1992. – 244 с.: ил.
2. Медведев И.И., Красноштейн А.Е. Аэрология калийных рудников / УрО АН СССР. – Свердловск, 1990. – 251 с.: ил.
3. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Реконструкция. Эксплуатация. – М.: Недра, 2007. – 324 с.: ил
4. Зайцев А.В. Научные основы расчета и управления тепловым режимом подземных рудников: дис. ... д.т.н.; 25.00.20: защищена 23.05.19 / Зайцев Артем Вячеславович. – Пермь, 2019. – 247 с.
5. Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: дис. ... д.т.н.; 25.00.20 / Шалимов Андрей Владимирович. – Пермь, 2012. – 329 с.
6. Казаков Б.П., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Исследование устойчивости совместной работы подземных вентиляторов в калийном руднике при применении рециркуляции // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 2. – С. 108-119. – DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-108-119.
7. Зайцев А.В., Трушкова Н.А. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовой выделенности в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 3. – С. 34-46. – DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_34.

УДК 622.831.322

DOI:10.7242/echo.2023.2.16

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГАЗОНОСНОСТИ ПО СВЯЗАННЫМ ГАЗАМ ПОРОД НА УЧАСТКАХ МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ

О.В. Иванов

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Представлены первые результаты количественной и качественной оценки газоносности по связанным газам калийно-магниевых солей и вмещающих пород в пределах Западно-Перелюбского, Восточно-Перелюбского, Западно-Целинного, Восточно-Целинного и Западно-Иванихинского, Центрально-Иванихинского лицензионных участков, расположенных в Саратовской области. Лабораторные исследования газоносности по связанным газам проводились на специальной лабораторной установке методом сухой механической дезинтеграции, заключающемся в измельчении породы определенной массы до частиц размерами в несколько микрон с постоянным контролем температуры и давления в процессе размала и последующим хроматографическим анализом компонентного состава выделившихся газов.

Ключевые слова: лицензионные участки, калийно-магниевые соли, вмещающие породы, газодинамические явления, газоносность пород, связанные газы, компонентный состав, газовый хроматограф.

Введение

Газоносность пород включает в себя газоносность по свободным и газоносность по связанным газам. Многочисленными исследованиями по изучению газоносности соляных пород доказано, что газоносность пород по связанным газам составляет 10% от полной газоносности. Повышенная газоносность пород по связанным газам приводит к ослаблению физико-механических свойств пород и повышению вероятности возникно-