

РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА

УДК 622.411

К ОЦЕНКЕ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РЕЦИРКУЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ

Б. П. Казаков¹, А. В. Шалимов², Н. А. Трушкова²

¹*Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Комсомольский проспект, 29, 614990, г. Пермь, Россия*

²*Горный институт УрО РАН,
ул. Сибирская, 78а, 614007, г. Пермь, Россия*

Проанализированы возможности улучшения проветривания рабочих зон рудников за счет использования рециркуляционных систем. Показано, что дополнительная подача воздуха зависит от соотношений напора рециркуляционного источника тяги и общешахтной депрессии в месте его установки. Расчетным путем, на конкретном примере, доказано, что при наличии утечек могут возникать аварийные ситуации, вызванные резким сокращением поступления свежего воздуха в рабочую зону.

Депрессия, рециркуляция, вентиляционная сбойка, предельно допустимая концентрация, аэродинамическое сопротивление, напорная характеристика, рудники

Для улучшения проветривания рудников, наряду с повышением общешахтной депрессии более мощными вентиляторами главного проветривания, используются дополнительные подземные вентиляционные установки малой мощности, располагаемые на участках с недостаточным расходом воздуха. Каждый такой вспомогательный вентилятор является рециркуляционным, поскольку наличие утечек по системе выработок неизбежно приводит к образованию замкнутых контуров, с возвращением воздуха на всасывание вентилятора без выхода его на поверхность. При этом часть отработанного воздуха, концентрация вредных примесей в котором должна быть значительно меньше предельно допустимой, используется повторно [1, 2]. Для целенаправленной организации рециркуляционного проветривания, разрешенного правилами безопасности на калийных и каменно-соляных рудниках [3], используются источники тяги, размещаемые в сбойках между выработками, по одной из которых поступает свежий воздух, а по другой — отработанный. Масштаб рециркуляционного проветривания может быть различен — от отдельной панели или блока до горизонта или даже рудника в целом.

Научно-исследовательские работы проведены в рамках проекта № 13-5-026-АЭРО ориентированных фундаментальных исследований УрО РАН.

На рис. 1 дана схема проветривания рудника (или его части). Главная вентиляционная установка (ГВУ) за счет депрессии ΔP создает и поддерживает расход воздуха $Q_1^{(0)}$ через рудник, т. е. через вентиляционный и воздухоподающий стволы. Суммарное аэродинамическое сопротивление стволы, канала ГВУ и участков транспортного и вентиляционного штреков до того места, где предполагается прохождение сбойки между ними для размещения рециркуляционного вентилятора, обозначено R_1 . Сопротивление сети от этого места до труднопроветриваемого участка, включая сопротивление данного участка, для увеличения подачи воздуха к которому предполагается организация рециркуляционного проветривания, обозначено R_4 . Предположительно, недостаточный расход воздуха на этом участке — $Q_4^{(0)}$. Для упрощения модели все утечки на пути следования воздуха от транспортного штрека к вентиляционному перенесены к месту предполагаемого прохождения вентиляционной сбойки и обозначены расходом $Q_3^{(0)}$, а пути утечек имеют суммарное сопротивление R_3 . Уравнения 1-го и 2-го законов сетей для данной схемы имеют следующий вид:

$$\begin{cases} Q_1^{(0)} = Q_3^{(0)} + Q_4^{(0)}, \\ \Delta P = R_1 Q_1^{(0)} |Q_1^{(0)}| + R_4 Q_4^{(0)} |Q_4^{(0)}|, \\ R_3 Q_3^{(0)} |Q_3^{(0)}| = R_4 Q_4^{(0)} |Q_4^{(0)}|, \end{cases} \quad (1)$$

откуда исключением из системы уравнений неизвестных $Q_1^{(0)}$ и $Q_3^{(0)}$ получается расход воздуха через труднопроветриваемый участок:

$$Q_4^{(0)} = \sqrt{\frac{\Delta P}{R_4(1 + R_1/R_{34})}}, \quad (2)$$

где R_{34} — суммарное сопротивление двух параллельных участков с сопротивлениями R_3 и R_4 ($1/\sqrt{R_{34}} = 1/\sqrt{R_3} + 1/\sqrt{R_4}$). Используются следующие единицы измерения физических величин: депрессия и напор дополнительного вентилятора (даПа), расходы воздуха ($\text{м}^3/\text{с}$), аэродинамические сопротивления ($\text{даПа}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})^2$).

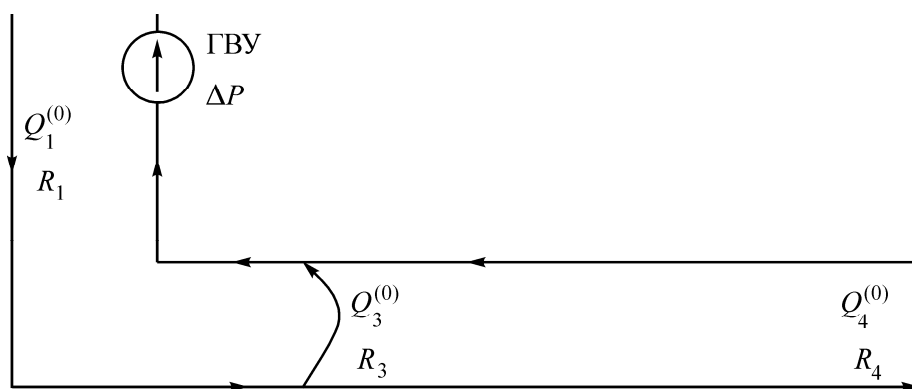


Рис. 1. Схема проветривания рудника без дополнительного вентилятора

После прохождения вентиляционной сбойки (считается, что $R_2 = 0$), размещения в ней и включения вентилятора ПВВУ (передвижной вспомогательной вентиляционной установки) (рис. 2) появляется напор Δp , величина которого зависит от расхода Q_2 , который целиком па-

дает на сопротивление R_4 . Напор $\Delta\pi$ не совпадает с напорной характеристикой вентилятора, так как перемычка, в которой он устанавливается, проницаема для воздуха и является причиной утечек. В результате величина $\Delta\pi$ уменьшается, поэтому

$$Q_4 = \sqrt{\frac{\Delta\pi}{R_4}}, \tag{3}$$

откуда изменение расхода воздуха на участке 4 с учетом (2) следующее:

$$\Delta Q_4 \equiv Q_4 - Q_4^{(0)} = \sqrt{\frac{\Delta\pi}{R_4}} - \sqrt{\frac{\Delta P}{R_4(1 + R_1/R_{34})}}. \tag{4}$$

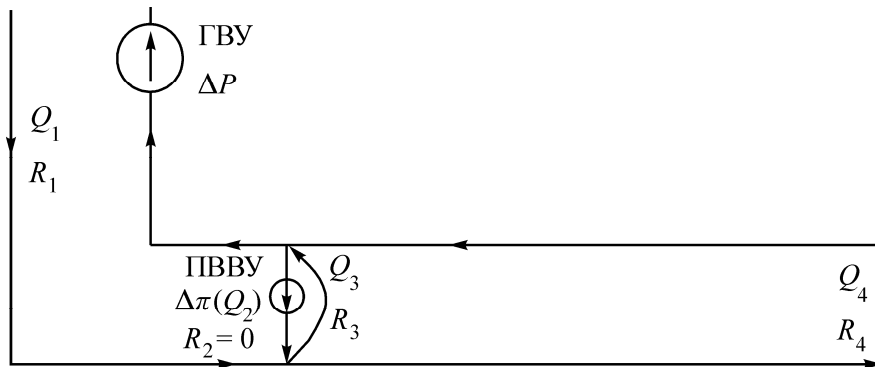


Рис. 2. Схема проветривания рудника с дополнительным вентилятором

Относительное изменение расхода воздуха на участке 4 после включения вентилятора будет

$$\varepsilon \equiv \frac{\Delta Q_4}{Q_4^{(0)}} = \sqrt{\frac{\Delta\pi}{\Delta P}} \sqrt{1 + \frac{R_1}{R_{34}}} - 1. \tag{5}$$

По формуле (5) можно сделать некоторые оценки относительно эффективности работы дополнительного вентилятора в подобной ситуации. Не исключен, например, вариант, при котором $\varepsilon < 0$, что соответствует “передавливанию” напора вентилятора общешахтной депрессией. В этом случае эффект от применения данного вентилятора отрицателен, так как $\Delta Q_4 < 0$ означает, что $Q_2 < 0$ и является дополнительной утечкой в виде встречного потока воздуха. Для реальных ГВУ и ПВВУ $\sqrt{\Delta\pi/\Delta P} \leq 1/5$ и $\varepsilon > 0$ при $\sqrt{1 + R_1/R_{34}} > 5$, т. е. $R_1/R_{34} > 24$. Поскольку для рассмотрения интересны только те ситуации, для которых $\varepsilon > 0$, а $1 \ll 24$, то единицей можно пренебречь. В результате получается необходимое условие положительной работы ($Q_2 < 0$) рециркуляционного вентилятора:

$$\Delta\pi > \frac{R_{34}}{R_1} \Delta P. \tag{6}$$

Однако выполнение (6) еще не означает, что вентилятор будет работать результативно по отношению к увеличению подачи воздуха на труднопроветриваемый участок 4. При соблюдении условия (6) результативность может быть рассчитана по формулам (4) или (5), причем необходимо учесть, что напор любого источника тяги, в том числе и эжектирующего $\Delta\pi = \Delta\pi(Q_2)$, является убывающей функцией Q_2 [4]. В противном случае, если задаться конкретным фиксированным значением $\Delta\pi$, получается, что чем больше утечки (меньше R_3), тем больше Q_4 . Очевидно, что увеличением утечек можно добиться положительной работы рециркуляционного вентилятора, если она была отрицательной, поскольку при этом ослабляется

действие общешахтной депрессии на сбойку, в которой он располагается. Но рост утечек не может повысить подачу воздуха на участок 4, так как при этом увеличивается Q_2 , соответственно уменьшается $\Delta\pi$ и, согласно (3), снижается Q_4 . Расход воздуха Q_4 будет тем больше, чем ближе к участку 4 располагается дополнительный вентилятор и чем меньше утечек воздуха между ним и этим участком.

Проведенные аналитические исследования эффективности использования маломощных рециркуляционных источников тяги на простых примерах свидетельствуют о том, что в зависимости от условий проветривания эффект может быть как положительным, так и отрицательным и даже приводить к возникновению аварийных ситуаций, связанных с увеличением концентрации вредных примесей на проветриваемых участках до предельно допустимых значений (ПДК) [5].

При разработке систем повторного использования воздуха необходимо учитывать, что вспомогательный источник тяги, обеспечивающий рециркуляцию воздуха, работает против депрессии главного вентилятора. Добавляя часть отработанного воздуха в свежую струю, он сокращает поступление свежего воздуха тем больше, чем больше дополнительный напор компенсирует общешахтную депрессию в месте установки.

На рис. 3 изображена упрощенная схема рециркуляционного проветривания удаленного участка рудника. Параметры сети приняты следующие: аэродинамические сопротивления участков: $R_1 = 0.025$ даПа/(м³·с)² — сопротивление сети (5000 м, 10 м²) до участка (20 м, 10 м²), моделирующего утечки (сопротивление $R_3 = 0.001$ даПа/(м³·с)²); $R_{23} = 0.001$ даПа/(м³·с)² — сопротивления выработок (500 м, 10 м²), соединяющих участок утечек и рециркуляционную сбойку ($R_2 = 0.001$ даПа/(м³·с)²; 20 м, 10 м²); $R_4 = 0.001$ даПа/(м³·с)² — сопротивление удаленного участка (500 м, 10 м²), подачу воздуха на который предполагается увеличить установкой в сбойку дополнительного источника тяги с напором $\Delta\pi$ (даПа), депрессия ГВУ $\Delta P = 500$ даПа, выделение метана в рабочей зоне 3 м³/мин. Представленная схема достаточно проста, но, тем не менее, анализ ее аналитическими методами сложен, поэтому использовался численный расчет с помощью соответствующего программного обеспечения [6].

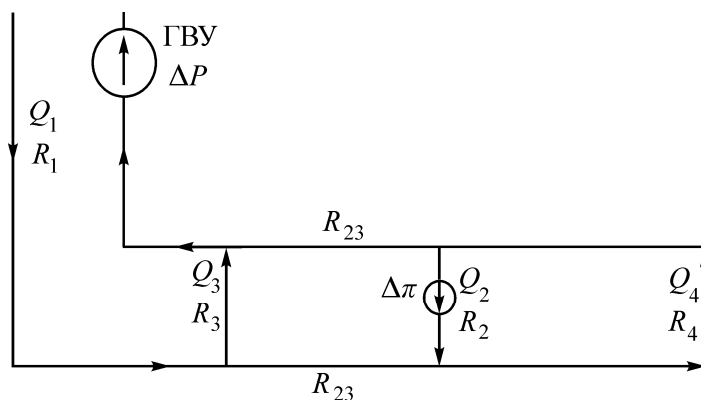


Рис. 3. Схема рециркуляционного проветривания с утечками

Предполагается, что с закрытой сбойкой подача воздуха на удаленный участок $Q_4 = 36$ м³/с недостаточна и требуется ее увеличение в 2.5 раза до 90 м³/мин. Модельный вентилятор с напором $\Delta\pi = 30$ даПа ставится в открытую рециркуляционную сбойку, затем напор понижается с небольшим шагом вплоть до нуля. На каждом шаге рассчитывается стационарное воздухо- и газораспределение на выходе из рабочей зоны (конец выработки № 4). Результаты расчета представлены на рис. 4.

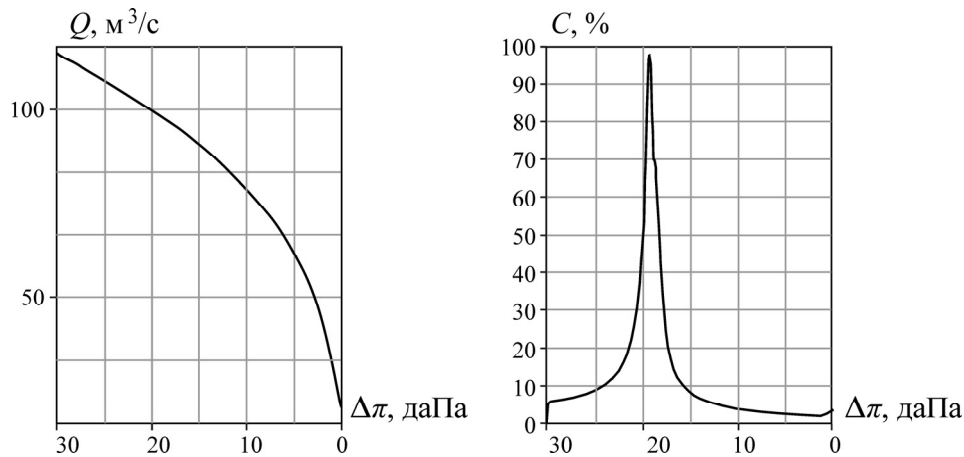


Рис. 4. “Рециркуляционное запираение” проветриваемого участка

По правилам безопасности концентрация метана на исходящей струе не должна превышать 1%. Из результатов расчета следует, что концентрация метана превышает норму при Δp от 16 до 24 даПа, что соответствует расходам Q_4 от 90 до 110 м³/мин. Таким образом, получается совсем не очевидный результат — увеличивать расход в 2.5 раза опасно, поскольку достигается 1 % концентрация метана, увеличение в 2.7 раза — приводит к аварийной ситуации, связанной с резким увеличением концентрации метана, а увеличение расхода в 3 раза оказывается безопасным. Причина возникновения такой неординарной ситуации заключается в том, что при определенном напоре вспомогательного источника тяги уравнивается напор ГВУ, падающий на трудно проветриваемый участок. Поступление свежего воздуха в него прекращается, проходит по пути утечек, и возникает 100 % рециркуляция. Дальнейшее увеличение напора Δp опрокидывает струю на участках R_{23} (см. рис. 3) и поступление свежего воздуха возобновляется в перевернутом виде. Подача свежего воздуха по пути утечек — нештатная, но не аварийная ситуация, поэтому она является допустимой мерой для предотвращения аварийных нарушений проветривания рабочих участков. Подобный анализ газовой обстановки в горных выработках в условиях рециркуляционного проветривания может быть проведен для любых источников газовыделения и вредных примесей, в том числе и для источников дыма во время рудничного пожара с учетом влияния тепловых депрессий на движение воздуха [7].

Предотвратить эффект прекращения поступления свежего воздуха в проветриваемый участок после установки дополнительного источника тяги в рециркуляционную сбойку можно также исключением утечек воздуха до сбойки со стороны главного вентилятора. Однако, как показывает практика, если такая возможность есть, то нет необходимости в организации рециркуляционного проветривания.

На руднике РУ-4 ОАО “Беларуськалий” в 2004–2005 гг. в работу введено несколько новых участков, которые позволили к концу 2006 г. увеличить объем добычи руды до 9.8 млн т в год. На тот момент времени на руднике плохо проветривались удаленные участки второго и третьего калийных горизонтов, а также наблюдалось выпадение больших объемов влаги на главных транспортных и конвейерных штреках в летнее время. Улучшить качество вентиляции труднопроветриваемых зон и микроклиматические параметры в горных выработках было предложено с помощью использования рециркуляционных систем, установленных в начале крыльев рабочих горизонтов. Горным институтом УрО РАН совместно с ОАО “Беларуськалий” начаты работы по разработке системы комплексного использования воздуха исходящих потоков для совершенств-

ования вентиляции и климатических параметров рудничного воздуха [8]. Исследованы составы исходящих и поступающих струй на запыленность и содержание вредных газовых компонентов, разработаны требования к качеству рециркуляционного воздуха и внедрены системы вентиляции с использованием отработанного воздуха на крыльях горизонтов рудника РУ-4 [9].

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований работы рециркуляционных источников тяги на простых примерах свидетельствуют о том, что в зависимости от условий проветривания эффект от их использования может быть как положительным, так и отрицательным, в том числе приводить к возникновению аварийных ситуаций, связанных с увеличением концентрации вредных примесей на проветриваемых участках до предельно допустимых концентраций.

Проектирование рециркуляционных систем должно сопровождаться предварительными расчетами их эффективности и безопасности, причем в условиях конкретного рудника, с учетом особенностей проветриваемого участка и с использованием соответствующего программного обеспечения [6], позволяющего проводить комплексный учет всех факторов, определяющих движение воздушных потоков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Красноштейн А. Е., Казаков Б. П., Шалимов А. В. Моделирование нестационарных процессов распространения газовых примесей по выработкам рудника в условиях рециркуляционного проветривания // ФТПРПИ. — 2006. — № 1.
2. Левин Л. Ю., Круглов Ю. В. Исследование рециркуляционного способа проветривания калийных рудников и его экономическая эффективность // ГИАБ. — 2008. — № 10.
3. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений полезных ископаемых подземным способом. ПБ 03-553-03. — М.: НТЦ по БП Госгортехнадзора России, 2003.
4. Казаков Б. П., Шалимов А. В. Особенности моделирования процесса эжектирования воздуха на базе законов сохранения энергии и количества движения выработок // Изв. вузов. Горн. журн. — 2006. — № 2.
5. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Киряков А. С. К вопросу энергосбережения проветривания рудников // ФТПРПИ. — 2013. — № 3.
6. Протасеня И. В., Береснев С. П., Круглов Ю. В., Гришин Е. Л., Киряков А. С. Единая информационно-аналитическая система “АэроСеть” для проектирования и расчета вентиляции калийных рудников // Горн. журн. — 2010. — № 8.
7. Красноштейн А. Е., Казаков Б. П., Шалимов А. В. К моделированию сложных аэрогазотермодинамических процессов в атмосфере рудников // ФТПРПИ. — 2008. — № 5.
8. Разработка системы комплексного использования воздуха исходящих потоков и других нетрадиционных источников энергоресурсов для совершенствования вентиляции и климатических параметров в руднике РУ-4 РУП “ПО “Беларуськалий”: отчет о НИР. — Пермь; Солигорск, 2002–2004.
9. Исследование вентиляционной сети рудника РУ-4 РУП “ПО “Беларуськалий” с разработкой рекомендаций и технических решений, направленных на экономию тепловой и электрической энергии: отчет о НИР. — Пермь; Солигорск, 2004–2005.

Поступила в редакцию 6/VIII 2013