

УЧЕТ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ СЕТИ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПАРАМЕТРОВ РЕЦИРКУЛЯЦИОННОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Н.А. Трушкова¹, Л.Ю. Левин¹, А.В. Зайцев¹

¹ Горный институт УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: aerolog_artem@gmail.com

Аннотация: Приведены результаты расчета потенциальной возможности снижения энергозатрат на проветривание при применении рециркуляции в зависимости от величины утечек внутри рециркуляционного контура и коэффициента рециркуляции, а также разработано выражение для определения коэффициента рециркуляции. Предложен подход к расчету энергоэффективности системы проветривания и выполнен анализ энергоэффективности при применении рециркуляции для различных значений величины внутренних утечек воздуха в рециркуляционном контуре. Также рассматривается вопрос определения параметров работы и места размещения рециркуляционной установки в горных выработках с целью достижения максимального энергосберегающего эффекта, который заключается в возможности снижения подачи свежего воздуха за счет работы главных вентиляторных установок. Установлено, что на эффективность работы рециркуляционных систем значительное влияние оказывает место их размещения в горных выработках рудника. В рамках анализа энергоэффективности построены графики для различных параметров проветривания и выявлено, что наличие минимума общего энергопотребления и его параметры определяются расположением рециркуляционной сбойки в привязке к аэродинамическим параметрам сети. Также приведена номограмма зависимости коэффициента рециркуляции от доли сопротивления выработок, входящих в рециркуляционный контур, с учетом величины внутренних утечек воздуха.

Ключевые слова: горная выработка, рудничная вентиляция, энергоэффективность, аэродинамическое сопротивление, внутренние утечки воздуха, рециркуляция, рециркуляционная установка, главная вентиляторная установка.

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

Для цитирования: Трушкова Н. А., Левин Л. Ю., Зайцев А. В. Учет аэродинамических характеристик вентиляционной сети при определении параметров рециркуляционного проветривания // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 9. – С. 5–16. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_5.

Inclusion of aerodynamic characteristics of ventilation systems in determination of recirculating ventilation parameters

N.A. Trushkova¹, L.Y. Levin¹, A.V. Zaitsev¹

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Perm, Russia, e-mail: aerolog_artem@gmail.com

Abstract: The calculated data on potential energy saving in ventilation with air recirculation as function of recirculation ratio and ventilation loss inside the recirculation circuit are described, and the expression to determine the recirculation ratio is constructed. An approach to calculating energy efficiency of ventilation system is proposed, and energy efficiency in recirculating ventilation is analyzed at different values of ventilation loss in the recirculation circuit. The issue of determination of parameters and location site of a recirculation plant in underground roadways is discussed with a view to reaching maximum energy saving, which means reduction of fresh air feed at the expense of operation of main fans. It is found that efficiency of recirculating systems greatly depends on location of recirculation plants in underground roadways. In the framework of the energy efficiency analysis, the curves of different ventilation parameters are plotted, and it is revealed that the minimum of the total energy consumption and its parameters are governed by the location of a recirculation cut-through bound with aerodynamic parameters of ventilation system. The nomogram of the recirculation ratio, air drag in roadways included in the recirculation circuit and the inner ventilation loss is plotted.

Key words: underground roadway, mine ventilation, energy efficiency, air drag, inner ventilation losses, recirculation, recirculation plant, main fan.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of a large research project, Agreement No. 075-15-2024-535 от 23.04.2024.

For citation: Trushkova N. A., Levin L. Y., Zaitsev A. V. Inclusion of aerodynamic characteristics of ventilation systems in determination of recirculating ventilation parameters. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(9):5-16. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_9_0_5.

Введение

В настоящее время проведен колоссальный объем исследований и накоплен богатейший опыт по вопросам применения контролируемой рециркуляции в горных выработках рудников. Во многих трудах отечественных и зарубежных ученых отражены различные аспекты исследований, посвященных рециркуляции. Помимо фундаментальных трудов [1 – 3] и др. можно отметить прочие исследования, посвященные изучению рециркуляции. Среди них труды, в которых отражены подходы к расчету и мониторингу рециркуляционных систем [4 – 7]; работы, посвященные непосредственно расчету распространения газовых примесей [8, 9]; исследования, в которых указывается эффективность и безопасность применения контролируемой

рециркуляции с учетом газового состава воздуха исходящей струи [10 – 12], труды по повышению энергоэффективности систем проветривания при применении рециркуляции [13, 14]; исследование, где указано, что применение контролируемой рециркуляции позволяет отложить замену дорогостоящего вентиляционного оборудования, которая необходима в связи с высокими темпами роста производительной мощности рудников [15]; работа, где показано, что применение рециркуляции способствует снижению экологических рисков [16], и многие другие.

Несмотря на большой объем, проведенные исследования по рециркуляции не дают однозначного ответа по вопросам определения параметров работы и места размещения рециркуляционной

установки в горных выработках с целью достижения максимального энергосберегающего эффекта, который заключается в возможности снижения подачи свежего воздуха за счет работы главных вентиляторных установок (далее ГВУ). Величина снижения расхода свежего воздуха зависит от параметров работы рециркуляционной системы, которые, в свою очередь, зависят от места ее размещения в горных выработках рудника.

В настоящее время производительность рециркуляционной установки определяется в рамках расчета количества воздуха. Существуют различные подходы к этому вопросу, которые отражены в «Инструкции по расчету количества воздуха, необходимого для проветривания рудников Старобинского месторождений калийных солей» и «Технологическом регламенте по организации проветривания рудников ОАО «Уралкалий» для калийных рудников Старобинского и Верхнекамского месторождений соответственно. Так как данные методики учитывают условия и особенности проветривания калийных рудников и не учитывают непосредственным образом ненулевую концентрацию газа на входящей струе, которая возникает при применении рециркуляции, разработана общая методология расчета требуемого количества воздуха при использовании рециркуляции, применимая для рудников любого типа, основные аспекты которой отражены в [17, 18]. Использование приведенной методики позволяет определить производительность рециркуляционной установки, но не позволяет определить напор и не дает рекомендаций по месту размещения рециркуляционных систем.

Основное снижение энергопотребления при применении рециркуляции достигается за счет того, что не требуется подавать воздух через главные воздухоподающие выработки, обладающие, как

правило, большим аэродинамическим сопротивлением; это подтверждается натурными исследованиями аэродинамических параметров вентиляционных сетей [19], результат которых показал, что на большинстве исследуемых рудников значительная часть депрессии главной вентиляторной установки затрачивается на преодоление сопротивления вскрывающих выработок. Однако на некоторых рудниках депрессия подземной части соизмерима с депрессией вскрывающих выработок. Все это говорит о том, что при определении места размещения и параметров работы рециркуляционных установок следует учитывать аэродинамические параметры вентиляционных систем для достижения максимального энергосберегающего эффекта. Таким образом, включать в рециркуляционный контур главные воздухоподающие выработки, обладающие, как правило, большим аэродинамическим сопротивлением, не всегда целесообразно, а при выборе места размещения рециркуляции следует учитывать особенности вентиляционной сети, а именно долю аэродинамического сопротивления выработок главных направлений, входящих в рециркуляционный контур. При этом следует иметь в виду, что внутри рециркуляционного контура общий расход воздуха возрастает и дополнительно появляются энергозатраты на работу рециркуляционной установки.

Тезис о том, что применение рециркуляции позволяет задействовать объемы воздуха, которые непосредственно не участвуют в проветривании, и эффективность применения рециркуляционных систем повышается при задействовании максимального количества утечек в рециркуляционный контур, приводит к выводу, что следует стремиться к размещению рециркуляционных установок как можно ближе к вскрывающим выработкам. Однако в такой ситуации па-

параметры рециркуляционной системы могут быть соизмеримы с ГВУ, и в этом случае применение рециркуляции нецелесообразно. Также в таком варианте размещения рециркуляционная установка оказывает влияние на работу ГВУ, что может привести к смещению рабочей точки ГВУ за пределы рабочей области вентилятора. В противном случае, когда рециркуляционная установка размещена на удаленном участке, где влияние ГВУ незначительно, может возникнуть ситуация, когда рециркуляционная установка влияет на проветривание участка настолько сильно, что это может привести к опрокидыванию воздушной струи и к угрозе безопасности [20]. Также в исследовании [21] рассматриваются ситуации, когда рециркуляционная установка может оказывать значительное влияние на работу ГВУ, что приводит к негативным последствиям и повышает риск возникновения аварийной ситуации.

Вопросу выбора места размещения рециркуляционных систем посвящена работа [22], где приведены результаты исследований по определению оптимального места размещения рециркуляционной установки с точки зрения энергоэффективности, однако данные решения справедливы лишь для приведенных численных примеров с фиксированным коэффициентом рециркуляции и длиной горизонта до 2000 м. Сделан вывод, что суммарное энергопотребление зависит от расстояния между рециркуляционной сбойкой и рабочей зоной с учетом общей длины выработок горизонта. При этом указывается зависимость энергопотребления именно от длины выработок, что далеко не всегда указывает на величину их аэродинамического сопротивления, а также не рассматривается сопротивление вскрывающих выработок, величина которого в значительной степени влияет на энергопотребление ГВУ, и не учитывается комплексное влияние

особенностей топологии вентиляционной сети.

В настоящее время выбор места размещения проводится путем анализа вентиляционной сети с применением многовариантного моделирования, а соответствующие методики отсутствуют. Разработка подобной методики позволит значительно сократить время на определение вариантов размещения рециркуляционных систем в горных выработках и позволит выполнить оперативную оценку целесообразности применения рециркуляции в тех или иных условиях.

Таким образом, задача определения параметров рециркуляционного проветривания, к которым относятся место размещения, напор и производительность рециркуляционной установки, весьма актуальна. В данной работе поставлена цель провести анализ энергоэффективности вентиляционных систем при применении рециркуляции с учетом аэродинамических параметров системы. В связи с этим требуется проанализировать энергоэффективность рециркуляционного проветривания в зависимости от аэродинамических параметров рециркуляционного контура и параметров рециркуляции с целью определения места размещения и параметров работы рециркуляционной установки для достижения максимального энергосберегающего эффекта.

Математическая модель

Рассмотрим модель проветривания с рециркуляционным контуром, на которой приведено суммарное энергопотребление вентиляторных установок.

Разработанная модель основывается на модели, приведенной в [23], где выполняется оценка эффективности рециркуляции, но не проводится анализ влияния аэродинамического сопротивления выработок главных направлений. В текущей модели все сопротивления счи-

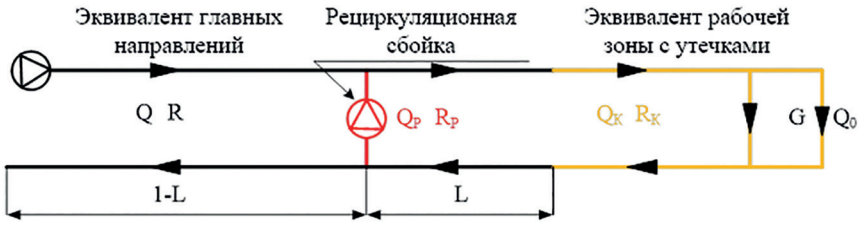


Рис. 1. Аэродинамическая модель рециркуляционного контура
 Fig. 1. Aerodynamic model of the recirculation circuit

таются фиксированными и выделяется три вида аэродинамических сопротивлений — аэродинамическое сопротивление главных направлений, аэродинамическое сопротивление выемочного участка (является эквивалентом общего сопротивления двух параллельных ветвей — рабочей зоны и утечек) и аэродинамическое сопротивление рециркуляционной сбойки. Также в модели введен дополнительный параметр L , зависящий от места размещения рециркуляционной установки. Чем больше данный параметр, тем больше доля аэродинамического сопротивления главных направлений, входящих в рециркуляционный контур.

В качестве основных параметров модели выбраны количество воздуха, подаваемого без учета рециркуляции и утечек Q_0 , коэффициенты утечек и рециркуляции в системе [17]. Коэффициенты утечек $K_{ут}$ и рециркуляции $K_{рец}$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} K_{ум} &= \frac{Q_k - Q_0}{Q_k} \\ K_{реци} &= \frac{Q_k - Q}{Q_k} \end{aligned} \quad (1)$$

где Q_0 — расход воздуха, поступающего на проветривание рабочей зоны, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_k — расход воздуха в рециркуляционном контуре, $\text{м}^3/\text{с}$; Q — расход свежего воздуха, поступающего в рециркуляционный контур, $\text{м}^3/\text{с}$.

В данной модели расходы воздуха с учетом коэффициента утечек и коэффи-

циента рециркуляции можно выразить так:

$$\begin{aligned} Q &= \frac{(1 - K_{реци} \cdot K_{ум})}{(1 - K_{ум})} Q_0 \\ Q_k &= \frac{(1 - K_{реци} \cdot K_{ум})}{(1 - K_{ум}) \cdot (1 - K_{реци})} Q_0 \\ Q_p &= \frac{K_{реци} \cdot (1 - K_{реци} \cdot K_{ум})}{(1 - K_{ум}) \cdot (1 - K_{реци})} Q_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Сопротивления отдельных ветвей в данной системе с учетом параметра L , зависящего от места размещения рециркуляционной установки, определяются как

$$\begin{aligned} R &= (1 - L) \cdot R_0 \\ R_k &= L \cdot R_0 + R_{пз} \\ R_p &= R_{сб} \end{aligned} \quad (3)$$

где R — аэродинамическое сопротивление главных направлений до рециркуляционной сбойки, $\text{Н}/\text{с} \cdot \text{м}^6$; R_0 — полное аэродинамическое сопротивление главных направлений, $\text{Н}/\text{с} \cdot \text{м}^6$; R_k — аэродинамическое сопротивление выемочного участка, $\text{Н}/\text{с} \cdot \text{м}^6$; R_p — аэродинамическое сопротивление рециркуляционной сбойки, $\text{Н}/\text{с} \cdot \text{м}^6$; L — доля сопротивления выработки главных направлений, входящая в рециркуляционный контур.

Зная расходы воздуха (2) и аэродинамические сопротивления участков (3), суммарное энергопотребление вентиляторных установок на поддержание за-

данного распределения расходов определяем выражением

$$N = (1-L) \cdot R_0 \cdot \left(\frac{(1-K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ум}})}{(1-K_{\text{ум}})} Q_0 \right)^3 + (L \cdot R_0 + R_{\text{пз}}) \cdot \left(\frac{(1-K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ум}})}{(1-K_{\text{ум}}) \cdot (1-K_{\text{рец}})} Q_0 \right)^3 + R_{\text{сб}} \cdot \left(\frac{K_{\text{рец}} \cdot (1-K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ум}})}{(1-K_{\text{ум}}) \cdot (1-K_{\text{рец}})} Q_0 \right)^3 \quad (4)$$

После некоторых преобразований полученный результат можно записать в виде

$$N = \left((1-L) \cdot R_0 + \frac{(L \cdot R_0 + R_{\text{пз}})}{(1-K_{\text{рец}})^3} + \frac{R_{\text{сб}} \cdot K_{\text{рец}}^3}{(1-K_{\text{рец}})^3} \right) \cdot \left(\frac{(1-K_{\text{рец}} \cdot K_{\text{ум}})}{(1-K_{\text{ум}})} Q_0 \right)^3 \quad (5)$$

Можно заметить, что первая скобка описывает эффективное сопротивление системы с учетом рециркуляционного контура, а вторая — эффективный расход свежего воздуха с учетом его снижения за счет рециркуляционного проветривания.

Анализ энергоэффективности

Для анализа полученной зависимости построим графики для следующего случая: пусть имеется проветриваемый рудник с сопротивлением подземной части $0,0025 \text{ Н/с} \cdot \text{м}^6$ и суммарным требуемым расходом свежего воздуха по фактору разжижения вредных газов объемом $300 \text{ м}^3/\text{с}$, а полное аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети равно $0,025 \text{ Н/с} \cdot \text{м}^6$ (на порядок больше сопротивления подземной части).

Построим графики зависимости мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции для следующих параметров:

- суммарные утечки внутри участка составляют 25%, рециркуляционная сбойка находится вне выработок главного направления (параметр L равен нулю);
- суммарные утечки внутри участка составляют 50%, рециркуляционная сбойка находится вне выработок главного направления;
- суммарные утечки внутри участка составляют 25%, часть сопротивления выработок главных направлений входит в рециркуляционный контур (параметр L равен 0,2).

Для варианта с суммарными утечками внутри участка 25% и размещением рециркуляционной сбойки вне выработок главного направления график изменения общего энергопотребления описывается кривой 1. В данном случае при увеличении коэффициента рециркуляции не происходит снижение суммарного энергопотребления. Резкий рост вызван существенным увеличением расхода внутри рециркуляционного контура при больших коэффициентах рециркуляции и резким возрастанием нагрузки на рециркуляционную установку для поддержания рециркуляции.

В случае, когда утечки составляют 50% при прочих равных параметрах, график энергопотребления имеет вид кривой 2, с четко выраженным участком снижения суммарной потребляемой мощности вентиляторных установок при коэффициенте рециркуляции до 0,6, при этом максимальное снижение суммарного энергопотребления составляет 33% при коэффициенте рециркуляции 0,5.

Если рассмотреть вовлечение в рециркуляционный контур части сопротивления выработок главного направления и принять параметр L равным 0,2, полу-

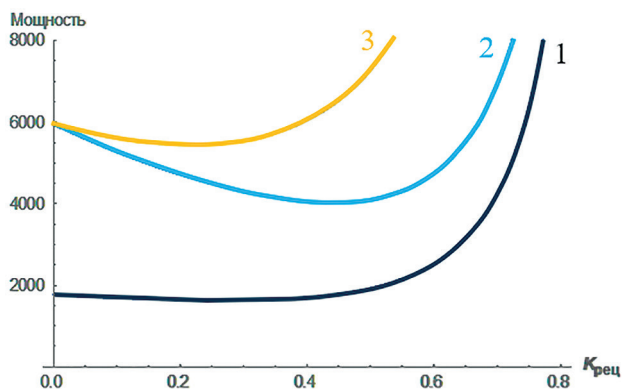


Рис. 2. Зависимость мощности вентиляторов от коэффициента рециркуляции при внутренних утечках 25% и $L = 0$ (1); 50% и $L = 0$ (2); 25% и $L = 0,2$ (3) соответственно

Fig. 2. Dependence of fan power on recirculation coefficient at internal leakages 25% and $L = 0$ (1), 50% and $L = 0$ (2) and 25% and $L = 0,2$ (3)

чим зависимость 3, где с увеличением коэффициента рециркуляции до 0,3 наблюдается менее значительное снижение общего энергопотребления относительно кривой 2, которое составляет 8% при коэффициенте рециркуляции 0,3.

Наличие минимума энергопотребления определяется двумя факторами:

- при увеличении коэффициента рециркуляции снижается энергопотреб-

ление ГВУ за счет уменьшения количества свежего воздуха, но возрастает энергопотребление рециркуляционной установки;

- наличие минимума и его параметры определяются расположением рециркуляционной сбойки в привязке к аэродинамическим параметрам сети.

Таким образом, можно видеть, что суммарное энергопотребление при при-

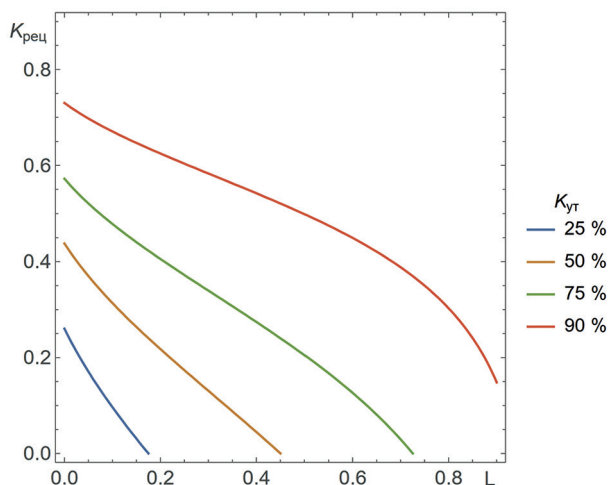


Рис. 3. Зависимость коэффициента рециркуляции от доли сопротивления выработок главного направления, входящих в рециркуляционный контур

Fig. 3. Dependence of the recirculation coefficient on the share of resistance of the main direction excavations included in the recirculation circuit

менении рециркуляции зависит от величины внутренних утечек воздуха внутри рециркуляционного контура и места размещения рециркуляционной установки (доли сопротивления выработок главных направлений, входящих в рециркуляционный контур).

Для более полного анализа зависимости коэффициента рециркуляции от доли сопротивления выработок главных направлений, входящих в рециркуляционный контур, построена номограмма, приведенная на рис. 3, где цветами обозначены кривые для разных значений коэффициента утечек. Аэродинамические параметры, для которых построена номограмма, соответствуют приведенному выше численному примеру, а именно: сопротивление подземной части рудника $0,0025 \text{ Н/с} \cdot \text{м}^6$, суммарный требуемый расход свежего воздуха по фактору разжижения вредных газов объемом $300 \text{ м}^3/\text{с}$ и полное аэродинамическое сопротивление вентиляционной сети $0,025 \text{ Н/с} \cdot \text{м}^6$. Соотношения сопротивлений в численном примере соответствуют условиям действующих рудников с большим сопротивлением вскрывающих выработок.

Анализ полученных зависимостей показал, что при малых значениях величины утечек 25% область размещения рециркуляционной установки для повышения энергоэффективности системы проветривания мала, тогда как при больших значениях коэффициента утечек диапазон размещения рециркуляционной установки относительно выработок главного направления значительно увеличивается; это позволяет подобрать параметры работы и место размещения рециркуляционной установки с учетом максимального снижения суммарной потребляемой мощности вентиляторов.

Следует отметить, что наличие минимума энергопотребления возможно не всегда, это также зависит от величины

внутренних утечек воздуха в рециркуляционном контуре.

Целесообразность применения и эффективность работы рециркуляционных систем зависит от места их размещения и, следовательно, от сопротивления участков вентиляционной сети до и после рециркуляционной выработки. Например, в случае, когда в рециркуляционный контур входит большая часть сопротивления системы, параметры рециркуляционной установки для обеспечения заданного коэффициента рециркуляции могут оказаться соизмеримы с ГВУ, и в этом случае применение рециркуляции нецелесообразно, а когда рециркуляционная установка размещена на удаленном участке, где влияние ГВУ незначительно, может возникнуть ситуация, когда рециркуляционная установка влияет на проветривание участка настолько сильно, что это может привести к опрокидыванию воздушной струи и к угрозе безопасности.

В результате проведенных исследований можно сформулировать основные этапы методики оценки энергоэффективности системы проветривания с учетом работы рециркуляционных установок, а именно:

- определение аэродинамических параметров вентиляционной сети;
- выполнение расчета требуемого количества свежего воздуха и коэффициента рециркуляции с учетом величины утечек внутри рециркуляционного контура;
- определение параметров рециркуляции (напора и производительности рециркуляционной установки);
- выбор вариантов мест размещения рециркуляционной установки относительно выработок главного направления;
- расчет энергоэффективности вариантов размещения рециркуляционной установки и выбор оптимального.

Таким образом, в статье приведены общие закономерности и качественные выводы, которыми необходимо руководствоваться при выборе места размещения рециркуляционных установок в системах проветривания рудников, но детальная разработка рециркуляционных схем проветривания должна основываться на сетевом математическом моделировании с использованием метода вариантов.

Выводы

В результате исследований разработаны основы методики оценки энергоэффективности системы проветривания с учетом работы рециркуляционных систем, выполнено определение места размещения рециркуляционной установки с целью достижения максимального энергосберегающего эффекта.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- эффективность работы рециркуляционных систем зависит от величины внутренних утечек в рециркуляционной контуре и от доли сопротивления выра-

боток главных направлений, входящих в рециркуляционный контур;

- при расчете энергоэффективности системы проветривания необходимо рассматривать параметры работы ГВУ и рециркуляционных установок с учетом аэродинамических параметров вентиляционной сети;

- результаты комплексной оценки энергоэффективности системы проветривания, выполненные по формуле (5) для численного примера, показали возможность снижения общего энергопотребления системы от 8 до 33% в зависимости от места размещения рециркуляционной установки и величины внутренних утечек воздуха.

Таким образом, рециркуляционное проветривание является мощным инструментом повышения энергоэффективности проветривания, а величина энергосберегающего эффекта зависит от параметров работы и места размещения рециркуляционной системы в зависимости от аэродинамических параметров вентиляционной сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев И. И., Красноштейн А. Е.* Аэрология калийных рудников. — Свердловск: УрО АН СССР, 1990. — 252 с.
2. *Красноштейн А. Е., Файнбург Г. З.* Диффузионно-сетевые методы расчета проветривания шахт и рудников. — Екатеринбург: УрО РАН, 1992. — 243 с.
3. *McPherson M. J.* Subsurface ventilation and Environmental engineering. Chapman & Hall, 2009, 824 p.
4. *Saindon J.-P.* Controlled recirculation of exhaust ventilation in Canadian Mines. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science. The University of British Columbia, 1987, 177 p.
5. *Круглов Ю. В.* Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 42 с.
6. *Бублик С. А., Зайцев А. В., Мальцев С. В., Семин М. А.* Анализ эффективности систем динамического управления проветриванием на калийных рудниках // Горное эхо. — 2021. — № 3. — С. 81 — 89. DOI: 10.7242/echo.2021.3.15.
7. *Семин М. А., Гришин Е. Л., Левин Л. Ю., Зайцев А. В.* Автоматизированное управление вентиляцией шахт и рудников. Проблемы, современный опыт, направления совершенствования // Записки Горного института. — 2020. — Т. 246. — С. 623 — 632. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.
8. *Семин М. А., Исаевич А. Г., Трушкова Н. А., Бублик С. А., Казаков Б. П.* К вопросу о расчете распространения вредных примесей в системах горных выработок // Физико-технические

проблемы разработки полезных ископаемых. — 2022. — № 2. — С. 82–93. DOI: 10.15372/FTPPI20220208.

9. Трушкова Н. А., Бублик С. А. Расчет распространения газовых примесей в горных выработках на основе модели конвективно-диффузионного переноса // Горное эхо. — 2021. — № 3. — С. 110–117. DOI: 10.7242/echo.2021.3.20.

10. Pritchard C. J., Scott D. F. Examination of controlled recirculation implementation in an underground nonmetal mine // Mining Engineering. 2014, vol. 66, no. 12, pp. 49–55.

11. 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, pp. 444–448.

12. Kazakov B., Trushkova N., Shalimov A., Grishin E. On the possibility of using controlled air recirculation in potash and metal mines / 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020. 2020, vol. 20, book no. 1.2, pp. 203–210. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.026.

13. Hall A. E., McHain D. M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines // Mining Science and Technology. 1990, vol. 10, no. 3, pp. 305–314.

14. Казаков Б. П., Левин Л. Ю., Шалимов А. В. Повышение эффективности ресурсосберегающих систем вентиляции для подземных рудников // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 26–28.

15. Van den Berg L., Manns K., Bluhm S. Controlled primary ventilation recirculation and re-use with reconditioning – A strategy for deep mines / Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress. Springer Singapore, 2019, pp. 27–41.

16. Мальцев С. В., Александрова М. А., Громова А. М. Влияние рециркуляционного проветривания на снижение выбросов парниковых газов калийного рудника // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. — 2023. — № 1. — С. 479–489.

17. Зайцев А. В., Трушкова Н. А. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовой выделености в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2022. — № 3. — С. 34–46. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_34.


18. Зайцев А. В., Трушкова Н. А. Исследование параметров рециркуляционного проветривания рабочих зон с учетом различных факторов расчета количества воздуха // Горное эхо. — 2023. — № 2. — С. 82–89. DOI: 10.7242/echo.2023.2.15.

19. Трушкова Н. А. Исследование аэродинамических параметров рудничных вентиляционных сетей для определения параметров рециркуляционного проветривания // Горное эхо. — 2020. — № 4. — С. 102–106. DOI: 10.7242/echo.2020.4.21.

20. Казаков Б. П., Шалимов А. В., Трушкова Н. А. К оценке аварийных ситуаций при проектировании рециркуляционных систем // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2014. — № 1. — С. 132–137.

21. 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. — 2021. — № 2. — С. 108–119. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-108-119.

22. Павлов С. А. Применение частичной рециркуляции воздуха для снижения энергозатрат на проветривание рудника // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2019. — Т. 6. — № 2. — С. 212–217. DOI: 10.15372/FPVGN2019060236.

23. Шалимов А. В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудников: Автореф. дис... д-ра техн. наук. — Пермь, 2012. — 34 с. 

REFERENCES

1. Medvedev I. I., Krasnoshteyn A. E. *Aerologiya kaliynykh rudnikov* [Aerology of potash mines], Sverdlovsk, UrO AN SSSR, 1990, 252 p.

2. Krasnoshteyn A. E., Faynburg G. Z. *Diffuzionno-setevye metody rascheta provetrivaniya shakht i rudnikov* [Diffusion-network methods for calculating ventilation of mines and mines], Ekaterinburg, UrO RAN, 1992, 243 p.

3. McPherson M. J. *Subsurface ventilation and Environmental engineering*. Chapman & Hall, 2009, 824 p.

4. Saindon J.-P. *Controlled recirculation of exhaust ventilation in Canadian Mines*. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Applied Science. The University of British Columbia, 1987, 177 p.

5. Kruglov Yu. V. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy postroeniya sistem optimal'nogo upravleniya provetrivaniem podzemnykh rudnikov* [Theoretical and technological foundations for building optimal control systems for ventilation of underground mines], Doctor's thesis, Perm, 2012, 42 p.

6. Bublik S. A. Analyzing the efficiency of dynamic ventilation control systems at potash mines. *Gornoe ekho*. 2021, no. 3, pp. 81 – 89. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.3.15.

7. Semin M. A., Grishin E. L., Levin L. Yu., Zaitsev A. V. Automated control of ventilation of mines and mines. Problems, modern experience, directions of improvement. *Journal of Mining Institute*. 2020, vol. 246, pp. 623 – 632. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2020.6.4.

8. Semin M. A., Isaevich A. G., Trushkova N. A., Bublik S. A., Kazakov B. P. Calculation of the spread of harmful impurities in the systems of mine workings. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2022, no. 2, pp. 82 – 93. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20220208.

9. Trushkova N. A., Bublik S. A. Calculation of gas impurities propagation in mine workings based on convection-diffusion transport model. *Gornoe ekho*. 2021, no. 3, pp. 110 – 117. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.3.20.

10. Pritchard C. J., Scott D. F. Examination of controlled recirculation implementation in an underground nonmetal mine. *Mining Engineering*. 2014, vol. 66, no. 12, pp. 49 – 55.

11. 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, pp. 444 – 448.

12. Kazakov B., Trushkova N., Shalimov A., Grishin E. On the possibility of using controlled air recirculation in potash and metal mines. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*. 2020, vol. 20, book no. 1.2, pp. 203 – 210. DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.026.

13. Hall A. E., McHain D. M., Hardcastle S. Controlled recirculation in Canadian underground potash mines. *Mining Science and Technology*. 1990, vol. 10, no. 3, pp. 305 – 314.

14. Kazakov B. P., Levin L. Ju., Shalimov A. V. Improving the efficiency of resource-saving ventilation systems for underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 5, pp. 26 – 28. [In Russ].

15. Van den Berg L., Manns K., Bluhm S. Controlled primary ventilation recirculation and reuse with reconditioning – A strategy for deep mines. *Proceedings of the 11th International Mine Ventilation Congress*. Springer Singapore, 2019, pp. 27 – 41.

16. Maltsev S. V., Aleksandrova M. A., Gromova A. M. Impact of recirculation ventilation on reducing greenhouse gas emissions from a potash mine. *News of the Tula state university. Sciences of Earth*. 2023, no. 1, pp. 479 – 489. [In Russ].

17. Zaitsev A. V., Trushkova N. A. Recirculating ventilation in the presence of gas emission source and internal air leaks in operating space. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2022, no. 3, pp. 34 – 46. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_3_0_34.

18. Zaitsev A. V., Trushkova N. A. Study of parameters of recirculation ventilation of working areas taking into account different factors of air quantity calculation. *Gornoe ekho*. 2023, no. 2, pp. 82 – 89. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2023.2.15.

19. Trushkova N. A. Study of aerodynamic parameters of mine ventilation networks to determine the parameters of recirculation ventilation. *Gornoe ekho*. 2020, no. 4, pp. 102 – 106. DOI: 10.7242/echo.2020.4.21.

20. Kazakov B. P., Shalimov A. V., Trushkova N. A. Assessment of emergencies in return air system design. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2014, no. 1, pp. 132 – 137. [In Russ].

21. Kazakov B. P., Grishin E. L., Trushkova N. A. Stability of joint operation of recirculating fans in underground potash mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 2, pp. 108 – 119. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-108-119.

22. Pavlov S. A. Application of partial air recirculation to reduce energy consumption for mine ventilation. *Mining sciences: fundamental and applied issues*. 2019, vol. 6, no. 2, pp. 212 – 217. [In Russ]. DOI: 10.15372/FPVGN2019060236.

23. Shalimov A. V. *Teoreticheskie osnovy prognozirovaniya, profilaktiki i bor'by s vavariynymi narusheniyami provetrivaniya rudnikov* [Theoretical foundations of forecasting, prevention and fight against emergency disruptions in mine ventilation], Doctor's thesis, Perm, 2012, 34 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Трушкова Надежда Анатольевна¹ — ведущий инженер,

e-mail: aero.nadezhda@gmail.com,

Левин Лев Юрьевич¹ — д-р техн. наук, профессор,

член-корреспондент РАН, заведующий отделом,

e-mail: aerolog_lev@mail.ru,

Зайцев Артем Вячеславович¹ — д-р техн. наук,

зав. лабораторией, e-mail: aerolog_artem@gmail.com,

¹ Горный институт УрО РАН.

Для контактов: Зайцев А.В., e-mail: aerolog_artem@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

N.A. Trushkova¹, Leading Engineer,

e-mail: aero.nadezhda@gmail.com,

L. Y. Levin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

Corresponding Member of Russian Academy of Sciences,

Head of Department, e-mail: aerolog_lev@mail.ru,

A. V. Zaitsev¹, Dr. Sci. (Eng.), Head of Laboratory,

e-mail: aerolog_artem@gmail.com,

¹ Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy

of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: A. V. Zaitsev, e-mail: aerolog_artem@gmail.com.

Получена редакцией 01.06.2024; получена после рецензии 03.07.2024; принята к печати 10.08.2024.

Received by the editors 01.06.2024; received after the review 03.07.2024; accepted for printing 10.08.2024.



НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»



Галкин В.И.

Современные ленточные конвейеры. Справочное пособие

Год: 2024

Страниц: 316

ISBN: 978-5-98672-571-0

UDK: 622.647.2

Представлен краткий исторический обзор основных этапов создания, развития и применения ленточных конвейеров. Приведен сравнительный анализ конструктивных и эксплуатационных особенностей основных узлов ленточных конвейеров различного назначения с учетом области их применения. Представлены параметры и технические характеристики оборудования. Сформулированы основные требования, предъявляемые к современным ленточным конвейерам, и дана классификация их технико-технологической эффективности и экологической безопасности. Разработан классификатор ленточных конвейеров на основе

их существующей и перспективной технической оснащенности. Обозначены перспективные направления развития ленточного конвейеростроения в России.

Для инженерно-технических и научных работников, занимающихся конструированием, проектированием и эксплуатацией специальных ленточных конвейеров, а также преподавателей, аспирантов, магистров, бакалавров и студентов старших курсов вузов соответствующего профиля.