

## **К ВОПРОСУ СНИЖЕНИЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ МОЩНОСТИ ВЕНТИЛЯТОРА ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СИСТЕМЫ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ВОЗДУХА В РУДНИКАХ**

*Станислав Александрович Павлов*

Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, 630091, Россия, г. Новосибирск, Красный пр., 54, кандидат технических наук, тел. (383)205-30-30, доп. 179, e-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru

Рассмотрен способ снижения потребляемой мощности вентилятора главного проветривания рудника за счет применения системы частичной рециркуляции воздушного потока. Приведены результаты вычислительных экспериментов воздухораспределения на обобщенной математической модели вентиляционной сети рудничного горизонта. Выявлены зависимости изменения потребляемой мощности при работе вентилятора главного проветривания от расположения рециркуляционной сбойки относительно рабочей зоны в пределах горизонта.

**Ключевые слова:** рециркуляция, рециркуляционная сбойка, вентиляционная сеть, рудничная вентиляция, вентилятор главного проветривания, энергопотребление.

## **REDUCTION OF MAIN VENTILATOR POWER CONSUMPTION BY MEANT OF APPLICATION OF AIR RECIRCULATION SYSTEM IN MINES**

*Stanislav A. Pavlov*

Chinakal Institute of Mining SB RAS, 54, Krasny Prospect St., Novosibirsk, 630091, Russia, Ph. D., phone: (383)205-30-30, extension 179, e-mail: pavlov\_s\_a@inbox.ru

The method of reduction main ventilator power consumption by means of application of fractional air flow recirculation system is considered. Results of calculating experiments of air distribution at extended mathematical model of mine ventilation network are represented. Dependences of consumed power changings when main ventilator works on placement of recirculation air hole relatively working zone within horizon are discovered.

**Key words:** recirculation, recirculation air hole, ventilation network, mine ventilation, main ventilator, power consumption.

### ***Введение***

В нашей стране, как и во всем мире, с каждым годом все более актуальным становится задача энергосбережения. Для горнодобывающих предприятий задача повышения энергоэффективности производства также является весьма актуальной. Учитывая, что на проветривание подземных горных выработок приходится от 30 до 50 % всей потребляемой подземным горнодобывающим предприятием электроэнергии [1], то для повышения энергоэффективности именно в этом направлении необходимо проводить научно-исследовательские изыскания.

На подземных горнодобывающих предприятиях еще в 30-х годов было предложено частичное повторное использование воздуха (рециркуляция) [2–4]. Это позволило снизить потребление энергетических ресурсов при воздухоподготовке в холодное время года, а в теплое время года избавиться от необходимости применения системы кондиционирования воздуха в неглубоких шахтах и рудниках [5–7]. Однако, в тоже время, закрепилось мнение [8, 9], что проветривание рудника или отдельных его участков с использованием рециркуляции приводит к накапливанию горючих и ядовитых газов в рабочей зоне и такое явление следует избегать.

Впервые решение временно использовать рециркуляционное проветривание было принято в угольных шахтах для регулирования микроклимата в пределах длинных очистных забоев [10]. Эта необходимость была понятна, поскольку, с увеличением протяженности выработок и их аэродинамического сопротивления, вентилятору главного проветривания (ВГП) все труднее обеспечить рабочие зоны (РЗ) требуемым количеством воздуха. Применение рециркуляционной схемы проветривания способствовало увеличению скорости воздушного потока в РЗ и интенсивному выносу вредных веществ, без дополнительного сооружения вспомогательных вентиляционных стволов.

Систему проветривания с рециркуляцией чаще рассматривают как вынужденную, временную меру для обеспечения требуемых микроклиматических условий на удаленных от ствола локальных участках подземного горнодобывающего предприятия [8, 9]. Использование системы проветривания с рециркуляцией для снижения потребляемой мощности ВГП, путем уменьшения аэродинамических потерь на перемещение воздуха от ствола до РЗ за счет снижения его количества, не рассматривалось. Способ снижения потребляемой мощности ВГП за счет применения системы рециркуляции, при условии обеспечения РЗ требуемым количеством воздуха, является весьма актуальной задачей.

### *Методы и материалы*

Вентиляционные сети подземных горнодобывающих предприятий уникальны и имеют свои особенности, поэтому в качестве объекта исследований для выявления общих закономерностей была принята обобщенная модель вентиляционной сети рудника, учитывающая осредненные значения аэродинамических сопротивлений для соответствующих участков выработок, имеющего один горизонт. В настоящей работе рассматривается протяженность горизонтов от 200 до 2000 м (рис. 1). Такую компоновку имеют шахты и рудники с центральной схемой проветривания и протяженными квершлагами. Подобные объекты встречаются, например, при доработке рудных тел, на этапе максимального развития карьера, когда дальнейшая отработка открытым способом является нерациональной и отработку руды продолжают подземным способом. В этом случае, стволы проводятся с бортов карьера, а капитальные выработки горизонтов имеют большую протяженность до границ рудного тела.

Для выявления закономерностей, влияющих на снижение энергопотребления проветривания рудника, проведены серии вычислительных экспериментов. Работа велась с использованием сетевой математической модели статического воздухораспределения, реализованной в программе SibRV, разработанной в ИГД СО РАН.

В процессе экспериментов, варьировались входные параметры: требуемый расход воздуха в рабочей зоне, длина вентиляционного и откаточного квершлагов, положение рециркуляционной сбойки относительно рабочей зоны и др.

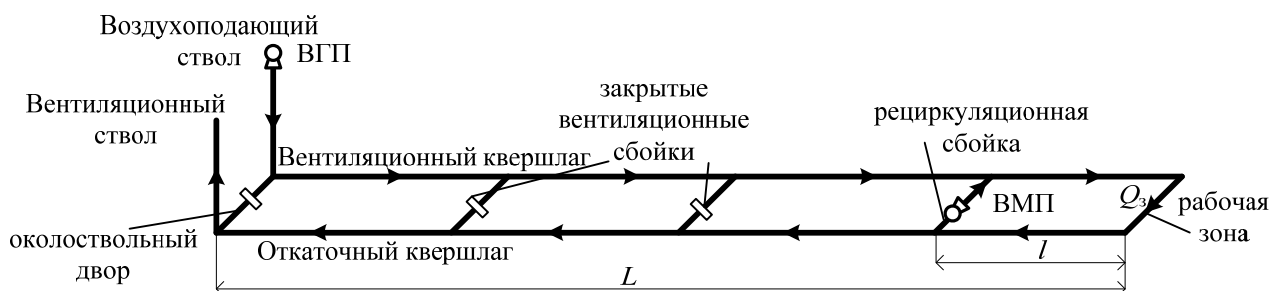


Рис. 1. Схема обобщенной вентиляционной сети рудника

Прежде всего, необходимо задаться граничными условиями проводимого исследования и определить минимальное количество, воздуха, которое требуется подавать в РЗ. При одновременном нахождении людей и техники в подземных условиях, основным является критерий по выхлопным газам, образующимся при работе дизельного оборудования.

Минимальное количество дизельной самоходной техники для отработки рудного тела, которые постоянно находятся в забое или на пути движения воздушных потоков, состоит из погрузчика (ПДМ), самосвала и бурильной установки.

До недавнего времени проветривание рудника с применением системы рециркуляции было бы затруднительным или вовсе невозможным из-за применяемой дизельной техники, имеющей колоссальные выбросы отработанных газов (ОГ) двигателей. Современные же комплексные системы очистки ОГ для ДВС (дизелей) состоят из каталитических нейтрализаторов, а также сажевых фильтров. Система одновременно обезвреживает и канцерогенные частицы сажи, и вредные окислы азота. Микропористый керамический фильтр, покрыт слоем накапливающего азот материала и катализатором на основе платины. Во время работы двигателя на бедной смеси частицы сажи окисляются атомарным кислородом, освобождающимся при соединении  $NO$  и  $O_2$  из выхлопных газов в процессе накопления  $NO_2$ . Применение таких систем позволяет значительно снизить токсичность ОГ дизелей. Согласно ФНиП ГР п. 338: содержание окиси углерода и окислов азота в отработавших газах двигателей машин проверяется перед спуском в шахту, а также в процессе эксплуатации в подземных условиях в сроки, предусмотренные ФНиП ГР.

Расход воздуха, необходимого для проветривания выработки по газовому фактору ( $Q_z$ ), производится по формуле:

$$Q_z = \frac{I_z}{(C - C_0)} \text{ м}^3/\text{мин},$$

где  $I_z$  – величина газовыделения в выработке,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;

$C$  – предельно допустимая концентрация содержания ядовитых газов (паров), установлена для содержания углекислого газа в рудничном воздухе, не должно превышать на рабочих местах 0,5 %;

$C_0$  – концентрация газа в воздухе на входящей струе, принимается равным ( $0,5 \times C$ ).

Газовыделение от работы машин с ДВС рассчитывается по формуле:

$$I_z = \frac{g_{\text{ДВС}} \cdot \sum M_{\text{ДВС}}}{\alpha_{\text{ДВС}}} \text{ м}^3/\text{мин},$$

где  $g_{\text{ДВС}}$  – суммарный выброс окиси углерода, углеводорода, окиси азота и твердых частиц в граммах на один кВт мощности ДВС в минуту, для машин с двигателем с воспламенением от сжатия – дизельных, он суммарно равен 12,25 мг в час, в пересчете на количество миллиграмм в минуту, принимается максимальная величина, 0,2 мг/мин;

$M_{\text{ДВС}}$  – номинальная мощность ДВС, машины работающей в забое, кВт;

$\alpha_{\text{ДВС}}$  – коэффициент, учитывающий суммарный выброс ДВС,  $\text{мг}/\text{м}^3$ , принимается по паспортным данным машины с ДВС в соответствие с техническим регламентом «О требованиях к выбросам автомобильной техники, выпускаемых в обращение на территории РФ, вредных загрязняющих веществ», в соответствии с «Правилами применения технических устройств на опасных производственных объектах», для сертифицированных машин с ДВС стандартом первого экологического класса – 0,25, второго класса – 0,29, третьего класса – 0,35, четвертого класса – 0,41, пятого класса – 0,5. Машины с ДВС проходящие по исходящей струе не учитываются в расчете.

Рассчитаем газовыделение и необходимое количество воздуха в забое при работе одной ПДМ с двигателем третьего экологического класса (как наиболее распространенного), номинальной мощностью 395 кВт.

$$I_z = \frac{0,2 \cdot 395}{0,35} = 225,7 \text{ м}^3/\text{мин}$$

$$Q_z = \frac{225,7}{(0,5 - 0,25)} = 902,8 \text{ м}^3/\text{мин} = 15,05 \text{ м}^3/\text{с}$$

Расчетом определено, что наибольшее значение необходимого расхода воздуха составляет  $15,05 \text{ м}^3/\text{с}$ . Учитывая, что в забое работает 3 единицы подобной техники, то минимальный расход воздуха, требуемый для отработки

руды в рабочей зоне в этом случае, составляет  $45 \text{ м}^3/\text{с}$ . Для подачи такого расхода, ВГП должен создать в рассматриваемой вентиляционной сети минимальную депрессию  $129,3 \text{ даПа}$  для горизонта, длиной  $200 \text{ м}$ , и максимальную –  $215,4 \text{ даПа}$ , для протяженности  $2000 \text{ м}$ .

### *Результаты*

Примем допущение, что при регулировке производительности вентилятора частотным приводом возможно поддерживать КПД постоянным и равным  $70 \%$ . Тогда потребляемая мощность ВГП для горизонта длиной  $200 \text{ м}$  составит  $83,1 \text{ кВт}$ , а для  $2000 \text{ м}$  –  $138,4 \text{ кВт}$ .

Установив вентилятор местного проветривания (ВМП) в рециркуляционной сбойке, и изменяя ее положение в сетевой модели относительно рабочей зоны, определялось в каком положении будет потребляться наименьшая суммарная мощность на проветривание, при подаче в рабочую зону постоянного расхода воздуха  $45 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Поскольку в рассматриваемом руднике применяется дизельная самоходная техника, то коэффициент рециркуляции, зависящий как от концентрации выделяемых транспортом вредных веществ, тепла, пыли и т.д. на разных объектах находится в пределах от  $0,15$  до  $0,45$  [11]. Примем осредненное значение коэффициента рециркуляции постоянным и для заданных условий равным  $0,3$ . КПД рециркуляционного вентилятора, за счет регулирования частотным приводом, примем постоянным –  $70 \%$ .

Ввиду большого количества проведенных вычислительных экспериментов, ниже рассмотрены только некоторые результаты математического моделирования воздухораспределения в вентиляционной сети рудника.

Ограничимся протяженностями горизонта:  $200$ ,  $1000$  и  $2000 \text{ м}$ . Построим график (рис. 2) изменения разницы потребляемой мощности при работе ВГП и совместной работы ВГП и ВМП ( $\Delta N$ ) для вариантов расположения рециркуляционной сбойки относительно рабочей зоны на:  $50$ ,  $100$ ,  $150$ ,  $250$  и  $500 \text{ м}$ .

Анализируя полученные результаты, видно, что  $\Delta N$  линейно зависит от расстояния между рабочей зоны и рециркуляционной сбойкой.

$$\Delta N = -0,02 \cdot l + 0,02 \cdot L$$

где  $L$  – протяженность горизонта;  $l$  – расстояние от рабочей зоны до рециркуляционной сбойки.

При увеличении протяженности горизонта или при увеличении производительности отработки рудного тела, количество применяемой самоходной дизельной техники возрастает. Это приводит к увеличению требуемого расхода воздуха. Определим зависимость разности потребляемой мощности при работе ВГП и совместной работы ВГП и ВМП ( $\Delta N$ ) от величины требуемого количества воздуха.

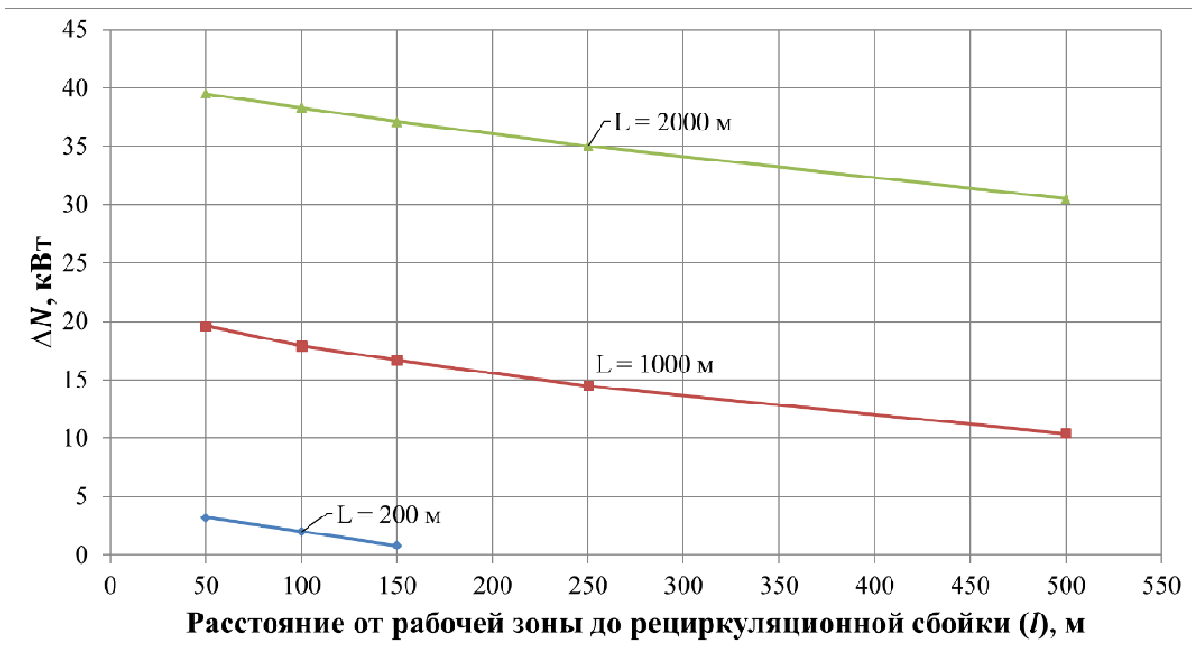


Рис. 2. Зависимость изменения разности потребляемой мощности при работе ВГП и совместной работы ВГП и ВМП ( $\Delta N$ ) от расположения рециркуляционной сбойки относительно рабочей зоны

Рассмотрим вариант при увеличении расход воздуха на  $20 \text{ м}^3/\text{с}$ . Тогда требуемый расход воздуха для отработки руды в рабочей зоне, для той же вентиляционной сети рудника, составит  $65 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Для этого, вентилятор главного проветривания (ВГП) должен создать депрессию  $269,7 \text{ даПа}$  для  $200\text{-метрового}$  горизонта и  $449,5 \text{ даПа}$  – для  $2000\text{-метрового}$ . Тогда потребляемая мощность ВГП при КПД  $70 \%$  для  $200 \text{ м}$  составит  $250,4 \text{ кВт}$ , а для  $2000 \text{ м}$  –  $417,4 \text{ кВт}$ .

Проведем вычислительные эксперименты и построим график (рис. 3) изменения разности потребляемой мощности при работе ВГП и совместной работы ВГП и ВМП ( $\Delta N$ )

Анализируя полученные результаты, видно, что  $\Delta N$  также имеет линейную зависимость от  $l$ .

$$\Delta N = -0,06 \cdot l + 0,06 \cdot L$$

где  $L$  – протяженность горизонта;  $l$  – расстояние от рабочей зоны до рециркуляционной сбойки.

Аналогичная зависимость получается при дальнейшем увеличении требуемого расхода воздуха в рабочей зоне до  $85 \text{ м}^3/\text{с}$ .

$$\Delta N = -0,1 \cdot l + 0,1 \cdot L$$

где  $L$  – протяженность горизонта;  $l$  – расстояние от рабочей зоны до рециркуляционной сбойки.

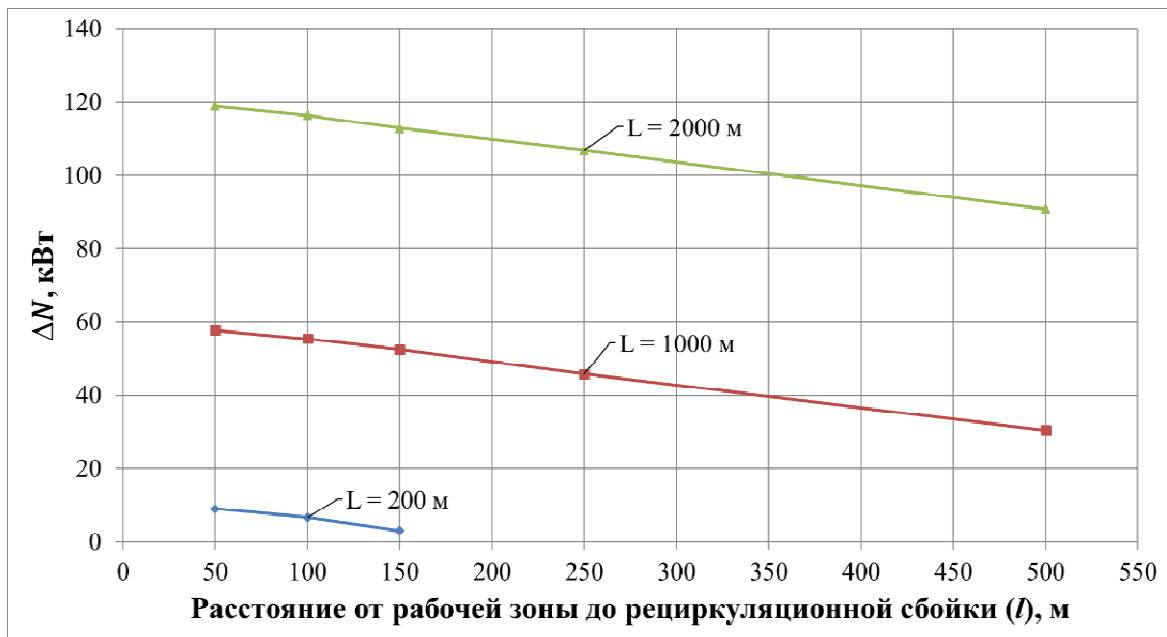


Рис. 3. Зависимость изменения разности потребляемой мощности при работе ВГП и совместной работы ВГП и ВМП ( $\Delta N$ ) для расположения рециркуляционной сбойки относительно рабочей зоны

Как видно, коэффициенты уравнений при  $l$  и  $L$  для соответствующих расходов одинаковы. В общем виде, уравнения имеют вид:

$$\Delta N = -n \cdot l + n \cdot L = n \cdot (L - l)$$

Из полученных результатов следует, что характер графиков изменения разности потребляемой мощности на проветривание  $\Delta N$  отличается коэффициентом  $n$  перед значениями длин в формуле, который изменяется с величиной требуемого расхода воздуха в рабочей зоне. Размерность коэффициента  $n$  - кВт/м, он показывает удельное изменение мощности на единицу длины горизонта.

Определим зависимость изменения этого коэффициента от величины требуемого расхода воздуха  $Q_3$ . Для этого построим и проанализируем график (рис. 4).

Анализ графика показывает, что:

$$n = 0,002 \cdot Q_3 - 0,07$$

Подставив значение  $n$  в предыдущую формулу, выведем зависимость:

$$\Delta N = (0,002 \cdot Q_3 - 0,07)(L - l)$$

или

$$\Delta N = (0,002 \cdot Q_3 - 0,07) \cdot L(1 - k)$$

$$k = \frac{l}{L}; 0,025 \leq k \leq 1$$

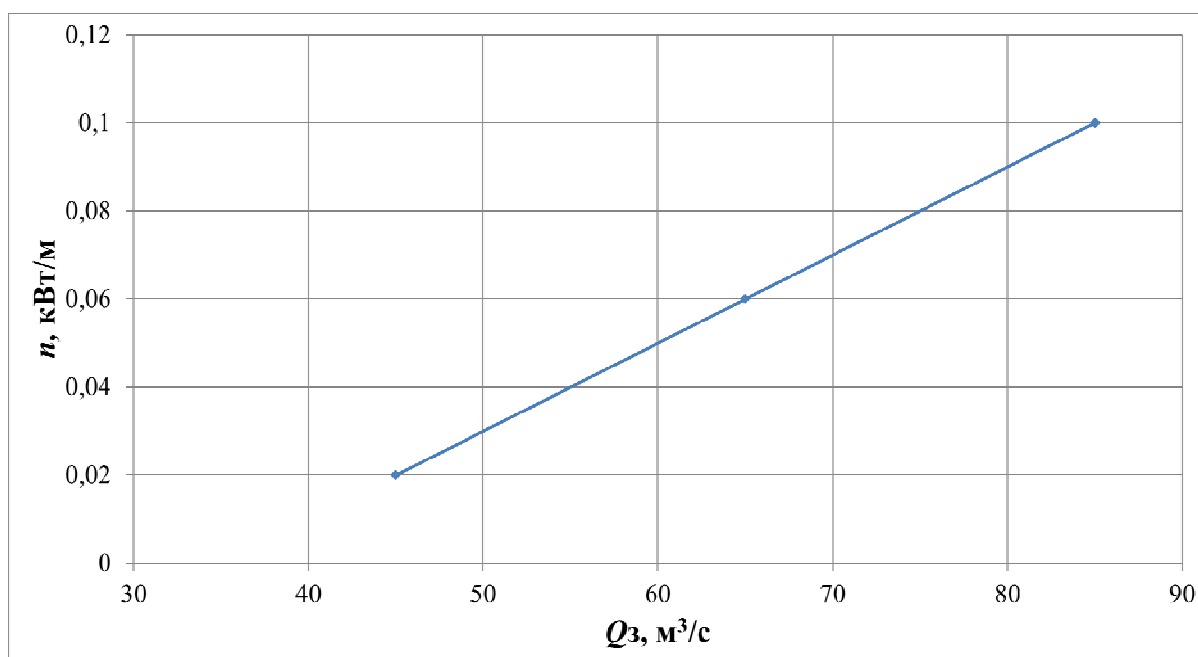


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $\eta$  от требуемого расхода воздуха в рабочей зоне

### Заключение

Применение системы рециркуляции воздуха в вентиляционной сети рудника позволяет снизить суммарную потребляемую мощность на проветривание его рабочей зоны. Величина снижения потребляемой мощности, относительно ее затрат при проветривании только главной вентиляторной установкой, прямо пропорционально зависит от протяженности горизонта и коэффициента  $k$ , являющимся соотношением расстояния от забоя до рециркуляционной сбойки, с установленным в ней вентилятором, к длине горизонта. При этом наибольшее снижение мощности на проветривание достигается при установке рециркуляционного вентилятора в сбойке, ближайшей к рабочей зоне.

*Работа выполнена в рамках научного проекта ФНИ № гос. регистрации АААА-А17-117091320027-5.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки калийных руд. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2007. – 522 с.
2. Мохирев Н.Н. Использование рециркуляции воздуха при проветривании калийных рудников // Известия вузов. Горный журнал. – 1987. – № 9. – С. 47–51.
3. Файнбург Г.З., Фоминых В.И. О расчете проветривания вентиляционных сетей добычного участка в режиме рециркуляции // Разработка соляных месторождений. – Пермь, 1980. – С. 60–64.



4. Красноштейн А.Е., Файнбург Г.З. Расчет газовой динамики при рециркуляционном проветривании добычного участка // Вентиляция шахт и рудников. – Л., 1978. – Вып. 5. – С. 26–32.
5. Николаев А.В., Файнбург Г.З. Об энерго- и ресурсосберегающем проветривании подземных горных выработок нефтешахт // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 14. – С. 92–98.
6. Николаев А.В., Алыменко Н.И. Применение системы кондиционирования воздуха с учетом тепловых депрессий, действующих между стволами // Горное оборудование и электромеханика. – 2011. – № 12. – С. 12–15.
7. Зайцев А.В., Ключкин Ю.А., Киряков А.С. Исследование процессов тепломассопереноса в горных выработках при применении систем частичного повторного использования воздуха // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2014. – № 11. – С. 121–129.
8. Комаров В.Б., Борисов Д.Ф. Рудничная вентиляция. – М.: ГОНТИ НКТП СССР, 1938. – 454 с.
9. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Вентиляция рудников. – М.: Горно-нефт. изд-во, 1933. – 418 с.
10. Lawton B.R. Local cooling underground by recirculation // Transaction of the Inst. Of Mining Engineers. – 1993. – Vol. 90, May. – p. 63-68.
11. Мохирев Н.Н., Радько В.В. Инженерные расчеты вентиляции шахт. Строительство. Ре-конструкция. Эксплуатация. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2007. – 324 с.

© С. А. Павлов, 2019