DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.10 УДК 622.4

© Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А., 2015

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ НА КАЛИЙНЫХ РУДНИКАХ ПРИ РЕВЕРСИРОВАНИИ ГЛАВНОЙ ВЕНТИЛЯТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Л.Ю. Левин, М.А. Семин, Ю.А. Клюкин

Горный институт Уральского отделения Российской академии наук, Пермь, Россия

Приводятся результаты экспериментальных исследований изменения воздухораспределения на рудниках БКПРУ-2, БКПРУ-4 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий» при плановом реверсировании главной вентиляторной установки. Разрабатывается методика проведения эксперимента: описаны выбор замерных станций, используемая измерительная аппаратура, порядок проведения замеров, расчетные формулы для определения аэродинамических сопротивлений и статистический анализ погрешности эксперимента. Исследуется изменение аэродинамического сопротивления отдельных участков вентиляционных сетей: канала главной вентиляторной установки, надшахтного здания, главных направлений горизонтов. Аэродинамические сопротивления каналов главной вентиляторной установки, вычисленные с помощью полученных экспериментальных данных, сравниваются с аэродинамическими сопротивлениями каналов, рассчитанными теоретически в вычислительном комплексе ANSYS. На основе сравнительного анализа делается вывод об относительной доле изменения местных аэродинамических сопротивлений и изменения сопротивления для канала в общем изменении аэродинамического сопротивления канала. Проводится анализ и классификация аэро- и термодинамических факторов, влияющих на изменение аэродинамических сопротивлений участков вентиляционных сетей рудников при реверсировании главной вентиляторной установки. Выделяется З группы факторов: неизмеримые, измеримые объективные и измеримые субъективные. Относительное влияние каждой из указанных 3 групп факторов индивидуально для каждого рудника и должно определяться отдельно. Первая группа факторов связана с погрешностью, вызванной ограниченностью условий и возможностей проведения эксперимента, и погрешностью экспериментального оборудования. Вторая группа факторов является предметом физического анализа с привлечением методов математического прогнозирования. Третья группа факторов не является объектом физического анализа, однако информация о влиянии субъективных измеримых факторов необходима при составлении нормативных документов по организации и проведению процедуры реверсирования главной вентиляторной установки.

Ключевые слова: рудничная вентиляция, реверсивный режим проветривания, местные аэродинамические сопротивления, естественная тяга, теплообмен, утечки воздуха, главная вентиляторная установка, вентиляционная сеть, экспериментальные исследования, нестационарное воздухораспределение, надшахтное здание, канал вентиляторной установки, главное направление горизонта, вентиляционная сбойка.

EXPERIMENTAL STUDY OF CHANGE IN AIR DISTRIBUTION ON POTASH MINES DURING REVERS OF MAIN FAN INSTALLATION

L.Yu. Levin, M.A. Semin, Yu.A. Klukin

Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

Paper shows results of experimental studies of change in oil distribution on mines BKPRU-2, BKPRU-4 and SKRU-3 of Uralkali OJSC during planned revers of main fan installation. The technique of experiment is developed: selection of metering stations, instrumentation used, measurement procedure, calculation formulas for determining the aerodynamic resistance and statistical analysis of the experimental error are described. The change of aerodynamic resistance of certain ventilation network sections are studied. There are among them: main ventilation installation channel, mine surface building and main horizon directions. Aerodynamic resistance of the main channel of fan installation calculated using experimental data and compared with the aerodynamic resistance of the channel calculated theoretically in ANSYS software. Based on comparative analysis the conclusion on relative share of changes in local aerodynamic resistance and change of resistance for channel in general channel aerodynamic resistance. The analysis and classification of aerodynamic and thermodynamic factors affecting change in aerodynamic resistance of ventilation network sections of mines during revers of main fan installation system were done. There are three groups of factors: immeasurable, measurable, measurable objectively and subjectively. Relative influence of each of these three groups of factors is for each individual mine, and must be determined separately. First group of factors is associated with an error caused by the limited conditions and possibilities of the experiment and error of experimental equipment. Second group of factors is a matter of physical analysis with use of mathematical prediction methods. Third group of factors is not the subject for physical analysis: however, information about the impact of the subjective measurable factors is essential to prepare documents for organization and performance of main fan installation reverse.

Keywords: mine ventilation, reverse ventilation regime, local aerodynamic resistances, natural traction, heat exchange, air leakage, main fan installation, ventilation network, experimental study, non-stationary air distribution, mine surface building, fan installation channel, main direction of horizon, air connection.

Введение

Действующие на территории Российской Федерации федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» предъявляют ряд требований к реверсивным режимам вентиляции рудников. Соблюдение данных требований необходимо для обеспечения безопасного вывода людей из рудника при ликвидации пожаров и задымлений. В частности, «расход воздуха, проходящего по главным выработкам при реверсивном режиме проветривания, должен составлять не менее 60 % от расхода воздуха, проходящего по ним в нормальном режиме».

Введение данного требования связано с тем, что при реверсировании главной вентиляторной установки (ГВУ) аэродинамические сопротивления различных участков рудничной вентиляционной сети изменяются, в результате чего воздухораспределение также изменяется. В частности, если при реверсивном режиме проветривания поддерживать производительность ГВУ такой же, как и при нормальном режиме проветривания, величины расходов воздуха на вентиляционных и транспортных штреках главных направлений при реверсивном режиме работы ГВУ могут существенно отличаться от величин расходов воздуха в нормальном режиме [1–5].

Основные факторы изменения аэродинамических сопротивлений горных выработок при реверсировании воздушной струи – изменение влияния местных аэродинамических сопротивлений, естественной тяги, теплообмена с породным массивом и утечек воздуха через надшахтное здание, ляды ГВУ и перемычки вентиляционных сбоек [3, 4, 6–8].

В настоящее время в литературе отсутствуют комплексные методы расчета воздухораспределения при реверсивном режиме проветривания, учитывающие все вышеперечисленные факторы, а существующие методы расчета воздухораспределения при нормальном режиме проветривания принципиально неполны и не позволяют корректно рассчитывать изменение воздухораспределения при переходе на реверсивный режим проветривания [4]. Во многом это связано с наличием малого количества экспериментальных исследований воздухораспределения при реверсивном режиме проветривания на рудниках. В существующих исследованиях по проблеме реверсирования затрагивается, как правило, один частный вопрос, касающийся суммарного времени реверсирования рудника, зависящего от объема выработанных пространств, протяженности рудника, влияния естественной тяги и тепловых депрессий [2, 4, 9]. Наличие большего количества экспериментальных исследований послужило бы базой для разработки и верификации новых моделей расчета воздухораспределения как при нормальном, так и при реверсивном режимах проветривания.

Таким образом, экспериментальные исследования закономерностей воздухораспределения в рудничных вентиляционных сетях при реверсировании ГВУ являются актуальными.

В данной работе разрабатывается методика оценки изменения воздухораспределения при реверсировании ГВУ и приводятся результаты проведенных экспериментальных исследований на рудниках БКПРУ-2, БКПРУ-4 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий».

Определение количества замерных станций и мест их расположения

На рис. 1 представлена принципиальная схема рудничной вентиляционной сети с одним горизонтом и одним главным направлением. Здесь и далее используется представление вентиляционной сети рудника в виде ориентированного графа, ветвями которого являются горные выработки, а узлами их сопряжения [10, 11].



На схеме укрупненно показаны различные участки вентиляционной сети: комплекс ГВУ (вентиляционный канал, ГВУ, диффузор), вентиляционный и воздухоподающий стволы, околоствольный двор, вентиляционные и транспортные сбойки главного направления, панели. Каждый из представленных участков в общем случае имеет различные аэродинамические сопротивления при движении воздуха в прямом и обратном направлениях. Различие в аэродинамических сопротивлениях в прямом и обратном направлениях течения воздуха на представленных участках связано в первую очередь с несимметричностью относительно направления движения воздуха местных аэродинамических сопротивлений:

– вентиляционных каналов ГВУ;

- диффузора;

 надшахтного здания вентиляционного ствола;

 надшахтного здания воздухоподающего ствола;

– сопряжения вентиляционного ствола с горизонтом;

– сопряжения воздухоподающего ствола с горизонтом;

- вентиляционных окон;

 вентиляционных сооружений в перемычках между воздухоподающими и вентиляционными штреками главных направлений.

Выбор участков на рис. 1 производится в соответствии с данными факторами местных сопротивлений, которые могут оказать существенное влияние на изменение воздухораспределения при реверсировании ГВУ. Относительный вес каждого из представленных факторов неизвестен и может существенно варьироваться на различных рудниках.

На рис. 1 также представлено множество экспериментальных замерных станций, используемых для определения аэродинамических сопротивлений указанных участков вентиляционной сети, названных заглавными буквами латинского алфавита.

Анализ погрешности измерительного оборудования

Для определения скорости воздуха применяется переносной рудничный взрывозащищенный анемометр АПР-2 крыльчатого типа с автономным питанием. Абсолютная погрешность данного прибора составляет

$$\Delta = 0, 2 + 0, 05V, \tag{1}$$

где V – скорость воздуха, м/с.

Измерение средней скорости воздуха в поперечном сечении горной выработки осуществляется согласно известной методике, описанной в работах [11, 12].

Для определения площади сечения горной выработки используется лазерный дальномер Leica Disto L2. Абсолютная погрешность данного прибора составляет 1,5 мм.

Для определения депрессии отдельных участков и выработок рудничной вентиляционной сети на практике применяются прецизионный портативный цифровой барометр DPI 740, позволяющий измерять абсолютные давления и вычислять депрессию произвольных участков вентиляционной сети. Абсолютная погрешность данного барометра при давлениях, близких к атмосферному, составляет 15 Па. Поэтому точность определения перепадов давления горных выработок и, как следствие, их аэродинамических сопротивлений ограничивается абсолютной величиной перепада давления на интересующем участке вентиляционной сети, который должен быть не меньше 100-150 Па.

Определение температуры и влажности воздуха осуществляется с помощью термовлагомера Fluke-971. Абсолютная погрешность измерения температуры в интервалах – 20–60 °С составляет 0,1 °С. Абсолютная погрешность измерения относительной влажности в интервалах 5–95 % составляет 2,5 %.

Температура и влажность измеряются на участках сопряжения стволов с горизонтами, на поверхности и в вентиляционном канале. По известной температуре, влажности воздуха и разности высотных отметок между горизонтом и поверхностью определяется величина гидростатического давления, действующего на данном участке ствола:

$$\Delta p = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} gh, \qquad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²; h – разница высот, м; ρ_1 и ρ_2 – плотности воздуха в верхней и нижней точках измеряемого участка ствола, рассчитанные на основании экспериментально измеренной температуры T и относительной влажности ϕ по формуле [4]

$$\rho = \frac{29P - 28,9\varphi(539, 2-T)(7, 4+T)}{8314(T+273)} \,. \quad (3)$$

На основании формулы (2) полученное множество экспериментальных замеров давлений приводится к единой высотной отметке посредством вычитания Δp . Из замеренных давлений $p_{\rm cB}$ на свежей струе воздуха вычитаются рассчитанные гидростатические давления для воздухоподающего ствола. Из замеренных давлений $p_{\rm вент}$ на вентиляционной струе вычитаются рассчитанные гидростатические давления для вентиляционной струе вычитаются рассчитанные гидростатические давления для вентиляционной струе вычитаются рассчитанные гидростатические давления для вентиляционного ствола.

Таблица 1

Участок вентиляционной сети	Формула
ГВУ (сопротивление вентиляционной сети)	$R_{\rm ac} = \frac{\Delta p(A,B)}{Q(B)^2}$
Канал ГВУ	$R_{\text{xair}} = \frac{\Delta p(D, B) - \Delta p(D, C)}{Q(C)^2}$
Надшахтное здание	$R_{_{\rm HS}} = \frac{\Delta p(D,C) - 0.5g(\rho_{C} + \rho_{B})(h_{C} - h_{B})}{Q_{_{\rm YT}}^{2}}$
Диффузор	$R_{\text{autp}} = \frac{\Delta p(A, D)}{Q(C)^2}$
Сопряжение вентиляционного ствола с горизонтом	$R_{\text{comp.Beht}} = \frac{\Delta p(D, E)}{Q(E)^2} - R_{\text{Beht.CTB}} - R_{\text{H3}}$
Направление	$R_{\text{hamp}} = \frac{\Delta p(E, D) - \Delta p(F, D) - 0.5g(\rho_{E} + \rho_{F})(h_{E} - h_{F})}{Q(E)^{2}}$
Утечки направления	$1 - \frac{Q(H)}{Q(F)}$
Панель	$R_{\text{matt}} = \frac{\Delta p(G, H)}{Q(G)^2}$

Формулы расчета аэродинамических сопротивлений участков вентиляционной сети

Для выявления относительного веса естественной тяги $H_{\rm ET}$ в измеряемом режиме воздухораспределения рудника сравниваются рассчитанные гидростатические давления для воздухоподающего и вентиляционного стволов.

$$H_{ET} = \Delta p_{\rm cs} - \Delta p_{\rm rett}.$$
 (4)

Расчет аэродинамических сопротивлений осуществляется исходя из экспериментально замеренных расходов, давлений, температур и влажности воздуха по формулам, представленным в табл. 1.

Найденные по таблице аэродинамические сопротивления для нормального и реверсивного режимов проветривания сравниваются и анализируются.

Латинскими буквами A-H обозначены различные станции, на которых проводились замеры (см. рис. 1). Q – расход воздуха, м³/с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; Δp – перепад давления, Па.

 $Q_{yT} = Q(C) - Q(E)$ – утечки воздуха через надшахтное здание, вычисляющиеся как разница расходов в вентиляционном стволе и в канале ГВУ.

*R*_{вент.ств} – аэродинамическое сопротивление вентиляционного ствола, вычисленное

на основании экспериментально определенных коэффициентов аэродинамического сопротивления α_{лин} линейного участка ствола, установленного при проведении воздушно-депрессионной съемки на руднике при нормальном режиме проветривания [13].

$$R_{\rm Beht,CTB} = \alpha_{\rm JHH} \frac{LP}{S^3},$$
 (5)

где S и P – площадь и периметр поперечного сечения ствола соответственно; L – длина ствола; h_C и h_B – высотные отметки на замерных станциях B и C соответственно.

Перепад давлений $\Delta p(C,B)$ в канале ГВУ рассчитывается по формуле

$$\Delta p(C,B) = \Delta p(D,B) - \Delta p(D,C)$$
(6)

для того, чтобы исключить влияние погрешности, связанной с использованием различных приборов по измерению давления. Перепады давления $\Delta p(D,B)$ и $\Delta p(D,C)$ в формуле (6) рассчитываются с помощью одного и того же барометра. Замер атмосферного давления в точке *D* в согласованный момент времени выполняется для каждого барометра.

Экспериментальные исследования изменения аэродинамического сопротивления каналов ГВУ при переходе на реверсивный режим проветривания

В рамках данного исследования сделаны экспериментальные замеры при плановом реверсировании на рудниках БКПРУ-2, БКПРУ-4 и СКРУ-3 ПАО «Уралкалий». Полученные данные сопоставлялись с известными результатами экспериментальных исследований реверса на руднике БКПРУ-4 за 2011 г. [9].

Расположение замерных станций в системе подводящих каналов рудников БКПРУ-4 и БКПРУ-2 представлено на рис. 2. Система подводящих каналов рудника СКРУ-3 совпадает с системой рудника БКПРУ-2. При нормальном и реверсивном режимах проветривания проводились замеры давления и расхода воздуха в сечениях С и В в согласованные моменты времени. На замерной станции С на протяжении всей процедуры реверсирования находилась бригада специалистов. На замерной станции В измерения параметров воздуха производились удаленно из машинного зала вентиляторной. Замерная станция В оборудована трубками Прандтля-Пито, позволяющими определять величины статического и динамического давления.

Аэродинамическое сопротивление участка между замерными станциями *B* и *C* определяется по формуле из табл. 1.

Полученные экспериментально значения аэродинамического сопротивления каналов ГВУ рудников БКПРУ-4 и БКПРУ-2 сопоставляются с теоретическими значениями аэродинамического сопротивления, полученными в результате численного моделирования в пакете ANSYS на компьютерных трехмерных моделях системы подводящих каналов рудников.

Перед проведением численных расчетов модели верифицируются на предмет устойчивости, сходимости и физической корректности получаемого решения. Построение нерегулярной тетраэдрической конечно-элементной сетки производится в модуле CFD Meshing. Расчет проводится в модуле Fluent на нескольких конечно-элементных сетках с целью исключения влияния способа дискретизации расчетной области на получаемые результаты.

Для моделирования шероховатости стенок каналов ГВУ использовалась модель песочной шероховатости – искусственное условие, когда на стенках задается плотная упаковка сфер одного размера. В данном случае K_s – диаметр сферического зерна, а C_s – коэффициент формы.



Рис. 2. Замерные станции в системе подводящих каналов рудников БКПРУ-4 (*a*) и БКПРУ-2 (*б*)

Согласно [14] для песочной шероховатости сопротивление в точности пропорционально квадрату скорости. Как показывают многочисленные экспериментальные замеры на рудниках [1, 10, 15–17], указанный квадратичный закон зависимости падения давления от скорости воздуха в горных выработках выполняется с высокой степенью точности. По данной причине применение модели песочной шероховатости качественно является физически обоснованным для случая горных выработок.

В табл. 2 приведено сопоставление аэродинамических сопротивлений канала ГВУ рудника БКПРУ-4, полученных при результате эксперимента и численного моделирования. Из таблицы видно, что в эксперименте аэродинамическое сопротивление при реверсивном режиме проветривания на 18 % выше, чем при нормальном. Численное моделирование также показало, что аэродинамическое сопротивление при реверсивном режиме возрастает на 14 %, а доля местных сопротивлений в общем перепаде давления составляет 70–80 %.

Возрастание местных сопротивлений связано с менее гладким обтеканием стенок каналов ГВУ при реверсивном режиме проветривания, а также с засоренностью каналов.

Таблица 2

Аэродинамические сопротивления вентиляционного канала ГВУ рудника БКПРУ-4

	Аэродинамическое				
Тип	сопротивление, H c^2/M^8				
величины	нормальный	реверсивный			
	режим	режим			
Эксперимент	0,0008 ± 0,00009	$0,00096 \pm 0,0001$			
Моделирование	0,00079	0,00090			

Таблица З

Аэродинамические сопротивления вентиляционного канала ГВУ рудника БКПРУ-2

Тип	Аэродинамическое сопротивление, H с ² /м ⁸			
величины	нормальный	реверсивный		
	режим	режим		
Эксперимент	$0,0011 \pm 0,0001$	$0,00065 \pm 0,00005$		
Моделирование (без утечек)	0,00104	0,00077		
Моделирование (утечки)	-	0,00067		

В табл. 3 приведено сопоставление аэродинамических сопротивлений канала ГВУ рудника БКПРУ-2, полученных в результате эксперимента и численного моделирования. Из таблицы видно, что в эксперименте аэродинамическое сопротивление при реверсивном режиме проветривания на 39 % ниже, чем при нормальном. Численное моделирование течения без утечек показало, что аэродинамическое сопротивление при реверсивном режиме падает на 26 %. Численное моделирование реверсивного течения с утечками 13 % показало, что аэродинамическое сопротивление в реверсивном режиме падает на 36 %.

Уменьшение сопротивления отрезка «ГВУ – сопряжение со стволом» при реверсировании связано с тем, что в реверсивном режиме геометрия проточной области имеет меньше поворотов потока.

Пониженное значение аэродинамического сопротивления в канале ГВУ при реверсивном режиме проветривания объясняется наличием утечек. При увеличении утечек воздуха через ляды ГВУ аэродинамическое сопротивление отрезка «ГВУ – сопряжение со стволом» уменьшается.

Экспериментальное исследование утечек через надшахтное здание

Согласно методике, изложенной выше, определены утечки воздуха через надшахтное здание при нормальном режиме проветривания для рудников БКПРУ-4, БКПРУ-2 и СКРУ-3 (табл. 4).

T	~	6	_				4
1	а	0	Л	И	ц	а	-4

Относительные утечки надшахтных зданий рудников БКПРУ-2, 4 и СКРУ-3

Dumme	Относительное значение утечек, %			
гудник	нормальный режим	реверсивный режим		
БКПРУ-4	10 ± 5	13 ± 5		
БКПРУ-2	17 ± 5	34 ± 5		
СКРУ-3	43 ± 5	59 ± 5		

Величина относительных утечек определялась как отношение абсолютного значения утечек к расходу воздуха в канале ГВУ.

Для рудников БКПРУ-2 и СКРУ-3 отмечается увеличение утечек воздуха через надшахтное здание при переходе на реверсивный режим проветривания. Для рудника БКПРУ-4 однозначного вывода относительно изменения утечек сделать нельзя. Увеличение экспериментального значения утечек при переходе с нормального на реверсивный режим для БКПРУ-4 меньше интервала погрешности определения утечек.

Надшахтное здание рудника БКПРУ-4 имеет наилучшую герметизацию из рассмотренных вариантов. При этом малая величина утечки через надшахтное здание рудника становится сопоставимой с погрешностью измерения расходов воздуха в канале ГВУ, которая, как правило, составляет около 10 % от расхода воздуха в канале.

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что внешние утечки воздуха на рудниках БКПРУ-2 и СКРУ-3 возрастают при реверсировании воздушной струи. Изменение величины внешней утечки воздуха на руднике БКПРУ-4 неизвестно по причине высокой герметизации надшахтного здания БКПРУ-4 и, как следствие, высокой погрешности определения внешних утечек в данном случае.

Изменение аэродинамического сопротивления вентиляционных сетей рудников

Как показали экспериментальные исследования, аэродинамические сопротивления сетей рудников БКПРУ-2, БКПРУ-4 и СКРУ-3 при реверсивном режиме проветривания ниже, чем при нормальном режиме. Это обусловлено рядом факторов:

 – уменьшением аэродинамических сопротивлений направлений вследствие изменения местных сопротивлений сопряжений и сопротивлений перемычек (БКПРУ-2, 4);

– уменьшением аэродинамических сопротивлений каналов ГВУ вследствие утечек через ляды (БКПРУ-2, СКРУ-3);

– уменьшением сопротивления надшахтного здания (БКПРУ-2, СКРУ-3);

 изменением местных сопротивлений комплекса ГВУ: подводящих каналов ГВУ и их сопряжения со стволом, диффузора (БКПРУ-2, 4, СКРУ-3).

Анализ относительного вклада каждого из данных факторов, проведенный на основании описанных ранее результатов замеров в комплексе ГВУ и подземной части рудника, представлен в табл. 5. Общее сопротивление сетей рудников рассчитывалось на основании обработанных данных производительности и депрессии ГВУ. К фактору утечек комплекса ГВУ относятся изменения сопротивления надшахтного здания и ляд канала ГВУ. К фактору утечек подземной части относятся изменения сопротивления вентиляционных дверей и перемычек, установленных в сбойках главного направления и на панелях.

На основе экспериментальных исследований воздухораспределения при реверсировании ГВУ и сопоставления их результатов

Таблица 5

Анализ относительного уменьшения общего сопротивления рудников БКПРУ-2, 4

Рудник	Относительное уменьшение сопротивления, %				
	комплекс ГВУ		подземная часть		
	местное	VTAU	местное	VTAU	ofillee
	сопротив-	y104-	сопротив-	yieu-	оощее
	ление	КИ	ление	Kri	
БКПРУ-4	-14 ± 2	25 ± 5	31 ± 6	< 6	35 ± 7
БКПРУ-2	45 ± 5	75 ± 5	15 ± 2	< 2	58 ± 11
СКРУ-3	-	81 ± 7	17±3	< 8	51 ± 9

с результатами теоретического моделирования проведена классификация факторов, влияющих на воздухораспределение при реверсивном режиме проветривания. Выделены группы измеримых и неизмеримых факторов. К неизмеримым относятся изменение сопротивлений отдельных вентиляционных сооружений, перемычек, погрешность оборудования, погрешность, связанная с неполностью установившимся режимом течения воздуха при проведении замеров, вызванная, в частности, кратковременностью проведения процедуры реверса.

Измеримые факторы подразделяются на 2 группы: объективные и субъективные. Объективными считаются факторы, которые имеют причины, связанные с аэродинамикой или термодинамикой воздушных потоков и поддаются научному анализу. Субъективными считаются факторы, которые имеют причины технологического рода, связанные с человеческим фактором и прочими неисправностями в работе рудника. Данные факторы представлены на рис. 3 с оценкой их относительного вклада по результатам проведенной экспериментальной съемки.

Объективные измеримые факторы могут являться объектом физического анализа и математического моделирования при исследовании закономерностей воздухораспределения при реверсировании ГВУ. Субъективные измеримые факторы не являются объектом теоретического физического анализа, однако информация об их влиянии является полезной при составлении нормативных документов по организации и проведению процедуры реверсирования ГВУ, а также по вентиляции рудника в целом.



Рис. 3. Факторы, влияющие на воздухораспределение при реверсе

Оценка доли каждой из групп факторов в общем изменении аэродинамических сопротивлений рудника производилась на основе данных табл. 5, а также на основе погрешности экспериментального определения аэродинамических сопротивлений.

Заключение

В данном исследовании приведена методика проведения замеров аэродинамических и микроклиматических параметров воздуха при реверсировании ГВУ, которая использована при проведении экспериментальных исследований сопротивлений рудников БКРПУ-4, БКПРУ-2 и СКРУ-3 при нормальном и реверсивном режимах проветривания. На основании анализа полученных экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

1. Общее сопротивление сетей рудников БКПРУ-4, БКПРУ-2 и СКРУ-3 при реверсировании ГВУ уменьшается соответственно на 35; 58 и 51 %, что связано с изменением сопротивлений комплекса ГВУ и главных направлений горизонта.

2. Изменение аэродинамических сопротивлений комплекса ГВУ, включающее в себя изменение местных сопротивлений диффузора, каналов ГВУ и сопротивлений вследствие утечек через ляды ГВУ и надшахтное здание, наиболее существенным образом меняется на рудниках БКПРУ-2 и СКРУ-3. Система подводящих каналов вентилятора ВРЦД-4,5 С1 на данных рудниках при реверсивном режиме проветривания имеет на 45 % меньшее аэродинамическое сопротивление в сравнении с нормальным режимом проветривания. Также на рудниках БКПРУ-2 и СКРУ-3 при реверсировании ГВУ утечки через надшахтное здание и ляды ГВУ увеличиваются в 2 и 1,4 раза соответственно. Утечки через надшахтное здание и ляды ГВУ рудника БКПРУ-4 практически не меняются при реверсировании ГВУ и составляют около 10 %. Система подводящих каналов вентилятора ВЦД-47 «Север» рудника БКПРУ-4 при реверсивном режиме проветривания имеет на 11 % большее аэродинамическое сопротивление.

3. При анализе утечек через надшахтные здания вентиляционных стволов рудников выяснилось, что внешние утечки воздуха на рудниках БКПРУ-2 и СКРУ-3 возрастают при реверсировании воздушной струи. Изменение величины внешних утечек воздуха на руднике БКПРУ-4 неизвестно по причине высокой герметизации надшахтного здания БКПРУ-4 и, как следствие, высокой погрешности определения внешних утечек в данном случае.

4. Изменение аэродинамических сопротивлений направлений на горизонте может варьироваться в широких пределах: от увеличения на 9 % до уменьшения на 45 %. Это связано с влиянием 2 факторов: изменением местных сопротивлений и изменением сопротивлений вентиляционных сооружений в сбойках. При этом, как показал анализ замеренных расходов воздуха на дальних направлениях рудников БКПРУ-2 и БКПРУ-4, главным фактором, определяющим изменение общего сопротивления направления, являются местные сопротивления.

Таким образом, исследования воздухораспределения в калийных рудниках при переходе с нормального на реверсивный режим работы ГВУ показали, что аэродинамические сопротивления различных участков вентиляционной сети зависят от ряда факторов, которые подразделяются на 3 группы: объективные измеримые, субъективные измеримые и неизмеримые. Относительный вклад каждой из указанных 3 групп факторов индивидуален для каждого рудника и должен определяться отдельно. Первая группа факторов является предметом физического анализа с привлечением методов математического прогнозирования. Вторая группа факторов не является объектом физического анализа, однако информация о влиянии субъективных измеримых факторов необходима при составлении нормативных документов по организации и проведению процедуры реверсирования ГВУ.

Список литературы

^{1.} Бодягин М.Н. Рудничная вентиляция. - М.: Недра, 1967. - 320 с.

^{2.} Постникова М.Ю. Влияние выработанных пространств на аэрогазодинамические процессы при аварийных режимах вентиляции рудников: дис. ... канд. техн. наук. - Тула, 2011. - С. 22-35.

Газизуллин Р.Р., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Влияние местных сопротивлений на воздухораспределение в рудниках при реверсивном режиме работы главной вентиляторной установки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 5. – C. 227–230.

^{4.} Шалимов А.В. Теоретические основы прогнозирования, профилактики и борьбы с аварийными нарушениями проветривания рудни-

KOB: JUC. ... J.-PA TEXH. HAYK. – HEPMS, 2012. – C. 32–45.
S. Hinsley F.B. A reaporaisal of the problems concerned with the reversal of the ventilation flow in an emergency // Transactions of the American Institute of Mining Engineers. – 1966. – Vol. 235. – P. 124–150.
Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan shutdown // International Journal of Heat and

Mass Transfer. - 2015. - Vol. 86. - P. 288-293. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.004.

^{7.} Левин Л.Ю., Семин М.А., Газизуллин Р.Р. Разработка метода расчета местных аэродинамических сопротивлений при решении сетевых задач воздухораспределения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2014. – № 9. – С. 200–206.

8. Levin L.Yu., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of under-ground excavations // Journal of Mining Science. - 2014. - Vol. 50, is. 2. - P. 371-378. DOI: 10.1134/S1062739114020203.

9. Круглов Ю.В. Теоретические и технологические основы построения систем оптимального управления проветриванием подземных рудников: дис. ... д-ра техн. наук. - Пермь, 2012. - 341 с.

10. Круглов Ю.В. Моделирование систем оптимального управления воздухораспределением в вентиляционных сетях подземных рудников: дис. ... канд. техн. наук. – Пермь, 2006. – 172 с. 11. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Зайцев А.В. Моделирование переходных процессов в вентиляционных сетях подземных рудников // Фи-

зико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2011. – № 5. – С. 101–109.

12. Ксенофонтова А.И., Карпухин В.Д., Харев А.А. Вентиляционное сопротивление горных выработок. – М., Л.: Углетехиздат, 1950. – 240 с.

13. Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. Обоснование участков измерения аэродинамических параметров воздушного потока при определении аэродинамического сопротивления стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2015. - № 5. - С. 69-75.

14. Schlichting H. Boundary-layer theory. 8th ed. - Berlin: Springer-Verlag, 2004. - 795 p.

15. Мохирев Н.Н. Разработка современных методов и средств обеспечения высокоэффективного проветривания рудников, обладающих малыми аэродинамическими сопротивлениями: дис. ... д-ра техн. наук. - Пермь, 1994. - 302 с.

Скопинцева О.В., Ушаков К.З. Регулирование шахтных вентиляционных сетей по фактору аэропинамического старения горных вы-работок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 1997. – № 3. – С. 142–147.
Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – М., Л.: Ухлетехиздат, 1949. – 444 с.

References

1. Bodiagin M.N. Rudnichnaia ventiliatsiia. Moscow: Nedra, 1967. 320 p.

2. Postnikova M.Iu. Vliianie vyrabotannykh prostranstv na aerogazodinamicheskie protsessy pri avariinykh rezhimakh ventiliatsii rudnikov [Im-

 pact of developed areas on aero and hydrodynamic processes in the emergency mode of mine ventilation]. PhD thesis. Tula, 2011. Pp. 22-35.
3. Gazizullin R.R., Levin L.Iu., Zaitsev A.V. Vliianie mestnykh soprotivlenii na vozdukhoraspredelenie v rudnikakh pri reversivnom rezhime raboty glavnoi ventiliatornoi ustanovki [Influence of local resistance on air distribution in mines during reverse mode of the main fan installation]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2012, no. 5, pp. 227-230.

4. Shalimov A.V. Teoreticheskie osnovy prognozirovaniia, profilaktiki i bor'by s avariinymi narusheniiami provetrivaniia rudnikov [Theoretical basis in forecast, prevention and control of the mine ventilation disturbance]. PhD thesis. Perm', 2012. Pp. 32-45.

Insley F.B. A reapproximation for the problems concerned with the reversal of the vertilation flow in an emergency. *Transactions of the American Institute of Mining Engineers*, 1966, no. 235, pp. 124-150.
Kazakov B.P., Shalimov A.V., Semin M.A. Stability of natural ventilation mode after main fan shutdown. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, vol. 86, pp. 288-293. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.03.004.

7. Levin L.Iu., Semin M.A., Gazizullin R.R. Razrabotka metoda rascheta mestnykh aerodinamicheskikh soprotivlenii pri reshenii setevykh zadach vozdukhoraspredeleniia [Development of method for calculation of local aerodynamic resistance]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2014, no. 9, pp. 200-206. 8. Levin L.Yu., Semin M.A., Zaitsev A.V. Mathematical methods of forecasting microclimate conditions in an arbitrary layout network of under-ground excavations. Journal of Mining Science, 2014, vol. 50, is. 2, pp. 371-378. DOI: 10.1134/S1062739114020203.

9. Kruglov Iu.V. Teoreticheskie i tekhnologicheskie osnovy postroeniia sistem optimal'noe upravleniia provetrivaniem podzemnykh rudnikov [Theoretical and technological basis of system construction for optimal control of underground mines ventilation]. PhD thesis. Perm', 2012. 341 p. 10. Kruglov Iu.V. Modelirovanie sistem optimal'nogo upravleniia vozdukhoraspredeleniem v ventiliatsionnykh setiakh podzemnykh rudnikov

[Simulation of systems of optimal control of air distribution in ventilation network of underground mines]. PhD thesis. Perm', 2006. 172 p. 11. Kruglov Iu.V., Levin L.Iu., Zaitsev A.V. Modelirovanie perekhodnykh protsessov v ventiliatsionnykh setiakh podzemnykh rudnikov [Simulation of tran-

sient processes in ventilation networks of underground mines]. Fiziko-teklnicheski problemy razraboki poleznitykh iskopaemykh, 2011, no. 5, pp. 101-109. 12. Ksenofontova A.I., Karpukhin V.D., Kharev A.A. Ventiliatsionnoe soprotivlenie gornykh vyrabotok [Ventilation resistance of mining]. Mos-cow, Leningrad: Ugletekhizdat, 1950. 240 p. 13. Kazakov B.P., Mal'tsev S.V., Semin M.A. Obosnovanie uchastkov izmereniia aerodinamicheskikh parametrov vozdushnogo potoka pri opre-

delenii aerodinamicheskogo soprotivleniia stvolov [Justification of sections measuring aerodynamic parameters of air flow during aerodynamic shaft resistance determination]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal), 2015, no. 5, pp. 69-75. 14. Schlichting H. Boundary-layer theory. 8th ed. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 795 p. 15. Mokhirev N.N. Razrabotka sovremennykh metodov i sredstv obespecheniia vysokoeffektivnogo provetrivaniia rudnikov, obladaiushchikh ma-

lymi aerodinamicheskimi soprotivleniiami [Development of modern methods and means of ensuring high efficiency ventilation of with low aerodynamic resistance]. PhD thesis. Permi, 1994. 302 p. 16. Skopintseva O.V., Ushakov K.Z. Regulirovanie shakhtnykh ventiliatsionnykh setei po faktoru aeropinamicheskogo stareniia gornykh vyrabo-

tok [Regulation of mine ventilation networks in accordance with factor of aerodynamic mine aging]. Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal),1997, no. 3, pp. 142-147.
17. Skochinskii A.A., Komarov V.B. Rudnichnaia ventiliatsiia [Mine ventilation]. Moscow, Leningrad: Ukhletekhizdat, 1949. 444 p.

Об авторах

Левин Лев Юрьевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, заведующий отделом аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а; e-mail: Aerolog_lev@mail.ru).

Семин Михаил Александрович (Пермь, Россия) - младший научный сотрудник отдела аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а; e-mail: mishkasemin@gmail.com).

Клюкин Юрий Андреевич (Пермь, Россия) - инженер отдела аэрологии и теплофизики Горного института Уральского отделения Российской академии наук (614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78-а; e-mail: aeroyuri@gmail.com).

About the authors

Lev Yu. Levin (Perm, Russian Federation) - Doctor of Engineering, Head of the Department of Aerology and Thermal Physics of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, 78 A Sibirskaia st.; e-mail: Aerolog_lev@mail.ru).

Mikhail A. Semin (Perm, Russian Federation) - junior researcher at the Department of Aerology and Thermal Physics of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, 78 A Sibirskaia st.; e-mail: mishkasemin@gmail.com).

Yurii A. Klukin (Perm, Russian Federation) – engineer at the Department of Aerology and Thermal Physics of the Mining Institute of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (614007, Perm, 78 A Sibirskaia st.; e-mail: aeroyuri@gmail.com).

Получено 08.09.2015

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А. Экспериментальное исследование изменения воздухораспределения на калийных рудниках при реверсировании главной вентиляторной установки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 17. – С. 89–97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.10

Please cite this article in English as:

Levin L.Yu., Semin M.A., Klukin Yu.A. Experimental study of change in air distribution on potash mines during revers of main fan installation. Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining, 2015, no. 17, pp. 89-97. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.17.10