

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ ПОДЗЕМНЫХ ВЕНТИЛЯТОРОВ В КАЛИЙНОМ РУДНИКЕ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РЕЦИРКУЛЯЦИИ

Б.П. Казаков¹, Е.Л. Гришин¹, Н.А. Трушкова¹

¹ Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН (ПФИЦ УрО РАН),
филиал ГИ УрО РАН, Пермь, Россия, e-mail: aero.nadezhda@gmail.com

Аннотация: Энергозатраты на проветривание шахт и рудников составляют до 30% от всего энергопотребления горнодобывающего предприятия. Размещение главных вентиляторных установок в подземных условиях является эффективным энергосберегающим мероприятием. В этом случае снижение количества потребляемой энергии обусловлено уменьшением величины внешних утечек и аэродинамического сопротивления, на которое работает главная вентиляторная установка. Повышение энергоэффективности проветривания калийных рудников достигается также посредством применения рециркуляционного проветривания. Эффективность данных мероприятий для случая размещения главных вентиляторов на поверхности неоднократно подтверждалась на практике. Однако в условиях подземного размещения главных вентиляторов такие системы предполагают наличие нескольких источников тяги, аэродинамически влияющих друг на друга. Применение подземных главных вентиляторных установок совместно с рециркуляционными системами может привести к смещению рабочих точек на аэродинамических характеристиках вентиляторных установок за пределы рабочих областей, что повлечет за собой нарушение устойчивой работы вентиляторных установок, нарушение аэрологической безопасности при ведении горных работ. Проведены исследования, направленные на определение устойчивых режимов совместной работы подземных главных вентиляторных установок и рециркуляционных установок с учетом их взаимного влияния для обеспечения эффективного и безопасного проветривания рудника.

Ключевые слова: рудник, главная вентиляторная установка, рециркуляция, вентиляционная сеть, воздухораспределение, устойчивость проветривания.

Благодарность: Работа выполнена в рамках гранта Минобрнауки № 0422-2019-0145-С-01 (регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690029-2).

Для цитирования: 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.

Stability of joint operation of recirculating fans in underground potash mines

B.P. Kazakov¹, E.L. Grishin¹, N.A. Trushkova¹

¹ Perm Federal Research Center, Ural Branch of Russian Academy of Sciences (PFRC UB RAS),
Mining Institute of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Perm, Russia, e-mail: aero.nadezhda@gmail.com

Abstract: Energy consumption for ventilation in underground mines makes 30% of the total power demand of a mine. The main fans effectively save energy in underground conditions. Reduction in energy input is achievable through the decrease in the external leakage and aerodynamic drag of installations of the main mine fans. Energy efficiency of airing in potash mines is also provided by recirculation ventilation. Efficiency of this approach in case of surface installation of the main fans has been practically proved many times. However, when the main fans are installed in underground mines, there appear a few cross-interfering sources of drag. Joint operation of an installation of the main mine fans and recirculation systems can cause displacement of operating points in the fan performance curves off the effective ranges, which can induce instability in operation of the fans and threaten the safety of mining. These studies are aimed at finding steady-state operating conditions for joint operation of the main mine fans and recirculation systems with regard to their cross-effect toward safe and efficient ventilation in underground mines.

Key words: mine, installation of main fans, recirculation, ventilation network air distribution, ventilation stability.

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Education and Science, Grant No. 0422-2019-0145-C-01, R&D Topic No. AAA-A18-118040690029-2.

For citation: 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;(2):108-119. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-2-0-108-119.

Введение

Как правило, главные вентиляторные установки располагаются на поверхности. При таком способе установки значительная часть депрессии, развиваемой главной вентиляторной установкой (далее ГВУ) затрачивается на преодоление сопротивления вскрывающих выработок. Это предполагает большую величину внешних утечек воздуха и энергозатрат на проветривание по сравнению с применением подземных главных вентиляторных установок (далее ПГВУ). Для снижения энергозатрат и повышения эффективности проветривания удаленных участков шахтного поля все чаще на рудниках устанавливаются подземные главные вентиляторные установки.

Вопросам повышения энергоэффективности систем вентиляции посвящены работы [1–7]. Также для снижения количества потребляемой энергии, повышения качества проветривания и безопасности ведения горных работ на руд-

никах все чаще применяются автоматизированные системы управления проветриванием, принципы построения и реализации таких систем приведены в работах [8–14]. В приведенных выше работах недостаточно раскрыта проблема обеспечения устойчивости работы параллельно установленных ПГВУ при применении рециркуляционных систем с учетом их взаимного влияния, изучению этого вопроса посвящена данная статья.

В статье объектом исследования является калийный рудник, который вскрыт тремя вертикальными стволами по центральной схеме. Оработка запасов ведется на Западном и Восточном направлениях, максимальное удаление рабочих зон от стволов составляет 7 км. Проветривание рудника осуществляется всасывающим способом. Также на руднике применяются системы частичного повторного использования воздуха, для этого на Западном и Восточном направ-

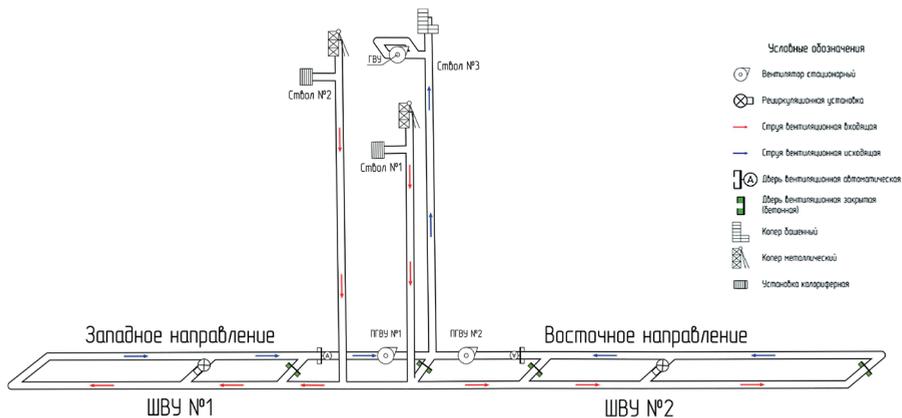


Рис. 1. Упрощенная модель вентиляционной сети рудника; места размещения ПГВУ после реконструкции системы вентиляции

Fig. 1. Simplified model of mine ventilation system, sites of underground installations of mine fans after ventilation system modernization

лениях размещены рециркуляционные установки (далее РУ) на базе вентилятора ВМ-12, максимальная производительность которых ограничена техническими характеристиками. Величина максимальной производительности принимается в качестве исходных данных к расчету требуемого количества воздуха.

В настоящее время на руднике проведена реконструкция системы вентиляции и поверхностная ГВУ ВЦД-47 заменена на две ПГВУ (рис. 1), располо-

женные на Западном и Восточном направлениях.

В случае организации проветривания рудника за счет двух и более подземных вентиляторов, работающих параллельно, возникает вероятность значительного взаимного влияния друг на друга.

На рассматриваемом руднике каждый вентилятор обеспечивает проветривание одного направления шахтного поля. При существенном изменении потребности в воздухе одного из направ-

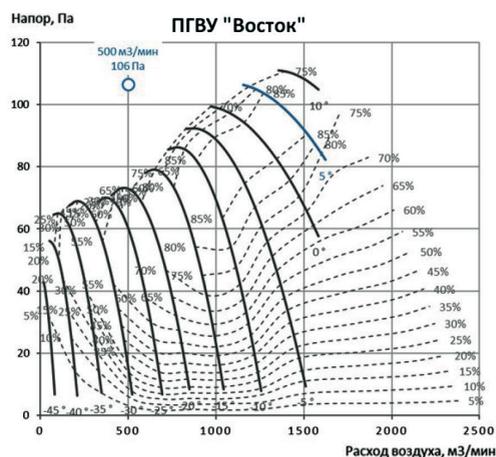
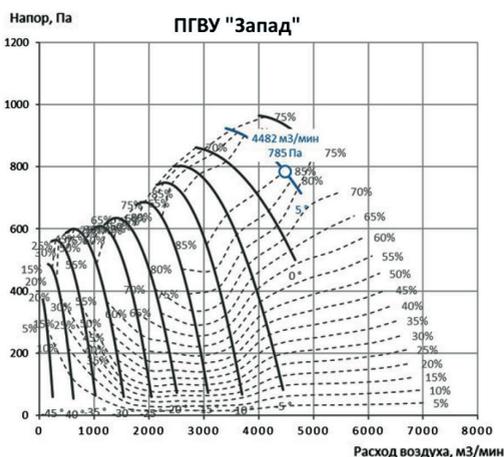


Рис. 2. Напорные характеристики ПГВУ «Запад» (слева) и ПГВУ «Восток» (справа)

Fig. 2. Head characteristics of underground installations of main fans: West (left) and East (right)

лений требуется снижение производительности вентилятора на соответствующем направлении при сохранении режима работы или увеличении производительности на другом направлении. В такой ситуации возникают серьезные проблемы, рабочая точка одного из вентиляторов выходит за границы рабочей области аэродинамической характеристики и происходит срыв потока.

Одним из примеров развития данной ситуации является резкое снижение потребности в воздухе Восточного направления по причине остановки добычи. На рис. 2 видно, что при сохранении параметров работы ПГВУ Западного направления рабочая точка ПГВУ Восточного направления находится в зоне помпажа. Это происходит по причине аэродинамического влияния двух ПГВУ.

В исследовании [15] были определены параметры работы вентиляторов с учетом их взаимного влияния, режимов их устойчивой работы в зависимости от технологических процессов в рабочих зонах, а также установлено, что работа рециркуляционных систем не оказывает влияния на устойчивость работы ПГВУ. В [15] рассматривалась совместная работа ПГВУ и РУ при существовавшем на тот момент времени развитии горных работ на руднике. Однако в ближайшее время на руднике планируется значительное расширение фронта очистных работ, поэтому становится весьма актуальной задача определения режимов устойчивой работы ПГВУ и мест размещения РУ с учетом перспективного развития горных работ. Решению данной задачи посвящена настоящая статья.

Исследование совместной работы ПГВУ и РУ с учетом перспективного развития горных работ

В настоящее время рециркуляционные установки расположены в начале

Западного и Восточного направлений в непосредственной близости от околоствольного двора. Данная схема помимо повышения энергоэффективности проветривания позволяет достигнуть в рудничной атмосфере максимального эффекта осушения воздуха в теплое время года.

На ближайшие пять лет вентиляционная сеть рудника претерпевает значительные изменения, фронт ведения очистных и проходческих работ значительно смещается к краям шахтного поля, и вводится дополнительное Северное направление. Протяженность горных выработок увеличивается более чем в два раза, это влечет за собой рост общего аэродинамического сопротивления вентиляционной сети.

При введении в схему дополнительного направления предполагается организация проветривания Западного и Северного направлений за счет ПГВУ № 1 («Запад»), а Восточного направления за счет ПГВУ № 2 («Восток»).

Для изучения режимов работы ПГВУ рудника с учетом перспективы развития горных работ на основании проведенных натурных исследований построена модель вентиляционной сети в аналитическом комплексе «АэроСеть» с использованием данных [16]. После построения модели вентиляционной сети проведен сравнительный анализ результатов моделирования и натурных исследований.

В результате анализа данных установлено, что натурные и модельные данные согласуются между собой, это говорит о том, что построенную модель можно использовать в дальнейших исследованиях. Упрощенная схема проветривания рудника с учетом перспективы развития горных работ представлена на рис. 3.

В ходе исследования необходимо было провести серию численных расче-

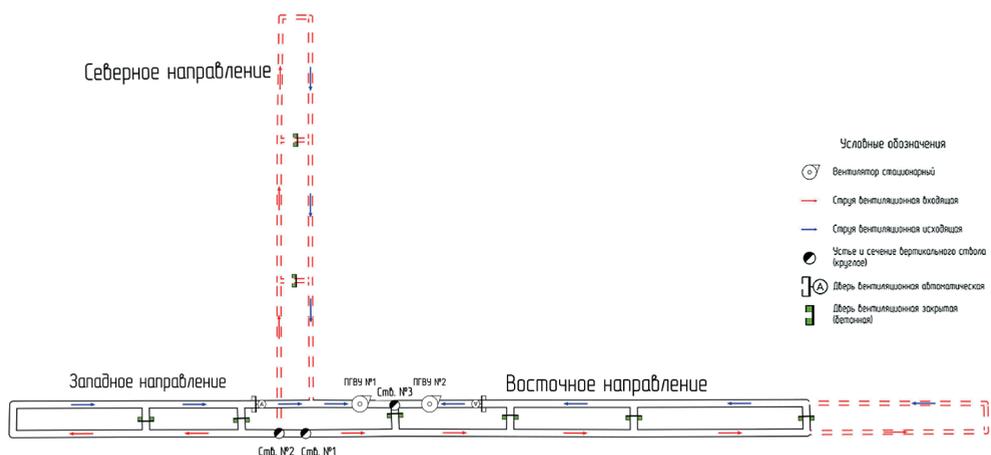


Рис. 3. Упрощенная модель вентиляционной сети рудника с учетом перспективного развития горных работ

Fig. 3. Simplified model of mine ventilation network with regard to progressive advance of mining operations

тов воздухораспределения на модели вентиляционной сети, целью которых является выбор оптимальных параметров работы ПГВУ и мест расположения рециркуляционных установок на трех направлениях рудника при максимальном удалении горных работ от стволов и наибольшей производительности рудника по добыче.

Следует отметить, что проведение численных расчетов осуществлялось не на упрощенной, а на полной модели вентиляционной сети рудника, насчитывающей более 1000 ветвей. В настоящей статье данная модель не представлена графически ввиду ее большого размера и сложности информативной визуализации. На построенной модели выпол-

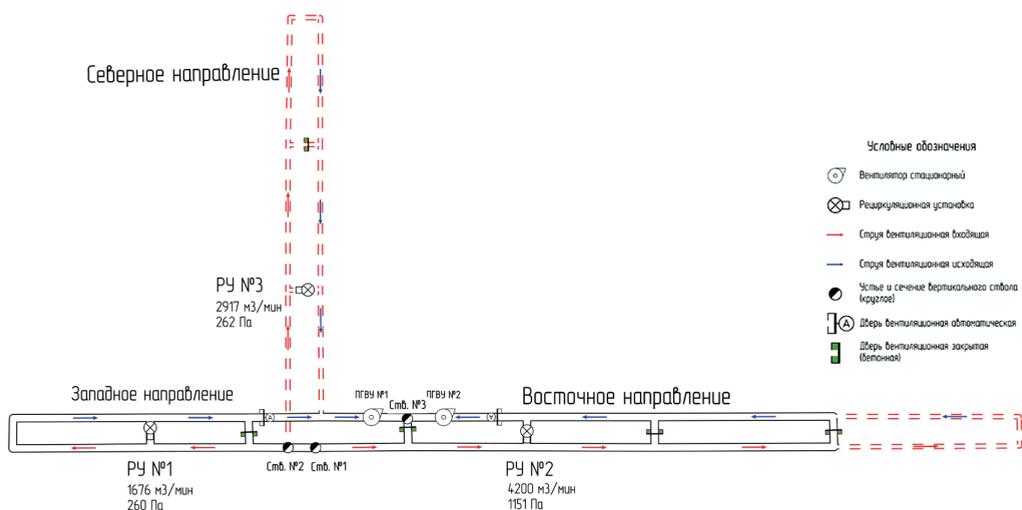


Рис. 4. Места размещения рециркуляционных установок с учетом перспективного развития горных работ

Fig. 4. Sites of recirculation installations with regard to progressive advance of mining operations

Таблица 1

Результаты расчета требуемого количества воздуха
Calculation data on air demand

Наименование участка	$Q_n, \text{ м}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{рец}}, \text{ м}^3/\text{мин}$	$Q_{\text{ПГВУ}}, \text{ м}^3/\text{мин}$
Восточное направление	6474	4196	3100
Западное направление	5268	1676	1415
Северное направление		2917	

нены расчеты параметров работы ПГВУ и РУ с учетом из взаимного аэродинамического влияния по пяти вариантам проветривания:

1. Рециркуляционные установки расположены в начале Северного, Западного и Восточного направлений, количество повторно используемого воздуха соответствует максимальной расчетной производительности РУ (по одной установке на каждом направлении).

2. Рециркуляционные установки расположены в начале Северного и Западного и в конце Восточного направления, количество повторно используемого воздуха соответствует максимальной расчетной производительности РУ (по одной установке на каждом направлении).

3. Рециркуляционные установки расположены в начале Северного, Западного и Восточного направлений, количество повторно используемого воздуха соответствует модельной производительности РУ (по одной установке на каждом направлении).

4. Рециркуляционные установки расположены в начале Северного, Западного и Восточного направлений, количество повторно используемого воздуха соответствует модельной производительности РУ (по одной установке на Северном и Западном направлениях и две установки на Восточном направлении).

5. Рециркуляционные установки расположены в конце направлений, количество повторно используемого воздуха соответствует модельной производитель-

ности РУ в данных условиях (по одной установке на каждом направлении).

Вариант 1

Для определения производительности рециркуляционных установок и потребности рудника в воздухе был выполнен расчет требуемого количества воздуха по действующей методике. Результаты расчета количества воздуха, требуемого для проветривания направлений с учетом всех потребителей и камер служебного назначения, а также производительность рециркуляционных установок и ПГВУ представлены в табл. 1.

Чем больше производительность рециркуляционной установки, тем меньше воздуха требуется подавать за счет ПГВУ и, следовательно, снижается количество потребляемой энергии ПГВУ. Данные расчета требуемого количества являются исходными данными для моделирования. В построенной модели вентиляционной сети выполнено моделирование воздухораспределения и установлено, что при применении рециркуляционных установок с расчетной производительностью рабочие точки ПГВУ Западного и Восточного направлений выходят за границы рабочей области. Места размещения и параметры рабочих точек рециркуляционных установок представлены на рис. 4.

Первоначально поставленная задача значительно усложняется тем, что помимо взаимного влияния двух ПГВУ для обеспечения устойчивости их работы необходимо также учитывать влия-

Таблица 2

Результат расчета требуемого количества воздуха при переносе РУ на расстояние от ПГВУ
Calculation data on air demand with recirculation installation spaced
from underground installation of main fans

Наименование участка	Q_n , м ³ /мин	$Q_{\text{рец}}$, м ³ /мин	$Q_{\text{ПГВУ}}$, м ³ /мин
Восточное направление	6146	3706	3238
Западное направление	5321	1676	1518
Северное направление		2878	

ние рециркуляционных установок на работу ПГВУ и наоборот при их расположении в непосредственной близости друг от друга.

Вариант 2

Необходимо рассмотреть вариант переноса рециркуляционных установок в такие места, где они не будут оказывать влияние на устойчивость работы ПГВУ, но в то же время сохранялся энерго-сберегающий и осушающий эффекты. Результаты расчета требуемого количества воздуха приведены в табл. 2.

Путем многовариантного моделирования установлено, что для обеспечения бесперебойной работы ПГВУ рециркуляционную установку Восточного направления необходимо разместить на расстоянии не менее 9 км от ПГВУ при общей длине направления 14 км. Ситуация с проветриванием Западного направления дополнительно осложнена тем, что наиболее развитие горных работ планируется на Северном направлении, а горные работы на Западном направлении смещаются в сторону стволов шахтного поля, в таких условиях пере-

нос рециркуляционной установки невозможен и при обеспечении производительности рециркуляционной установки согласно данным, представленным в табл. 2, не удастся вывести ПГВУ Западного направления на устойчивый режим работы путем переноса одной рециркуляционной установки.

Применение рециркуляционных установок с параметрами работы, обеспечивающими максимально возможную производительность, разрешенную нормативными документами, не позволяет добиться максимальной энергоэффективности, а приводит к выходу ПГВУ в помпаж.

Вариант 3

Рассмотрим организацию рециркуляционного проветривания за счет применения установок на базе вентилятора ВМ-12, при этом производительность рециркуляционных установок определяется по результатам моделирования. По аналогии с ранее проведенными расчетами первоначально выполнено моделирование варианта расположения рециркуляционных установок в начале

Таблица 3

Параметры работы РУ
Work process-related parameters of recirculation installation

Направление	Производительность, м ³ /мин	Напор, Па
Восточное направление	1684	1103
Западное направление	2314	613
Северное направление	2544	388

направлений. Установлено, что в таком случае рециркуляционная установка не развивает достаточного напора для преодоления напора ПГВУ, и работа ее неэффективна. Результаты моделирования легли в основу расчета требуемого количества воздуха для проветривания рудника при частичном повторном использовании воздуха.

По результатам моделирования вычислены параметры работы РУ, представленные в табл. 3.

Результат моделирования показал, что при данных параметрах работы рециркуляционных установок возникают проблемы и особенности проветривания направлений. На Западном и Северном направлениях максимальная модельная производительность рециркуляционных установок составляет 2314 м³/мин (максимальная рециркуляция 1676 м³/мин) и 2544 м³/мин (максимальная рециркуляция 2917 м³/мин) соответственно. На Восточном направлении максимальная производительность рециркуляционной установки составляет 1684 м³/мин вместо возможных 4200 м³/мин. В сложившейся ситуации в качестве исходных данных при расчете и моделировании для Восточного направления принята производительность рециркуляционной установки 1684 м³/мин, при этом производительность ПГВУ Восточного направления необходимо увеличивать для обеспечения рабочих зон требуемым количеством воздуха. В свою очередь, производительность ПГВУ Западного направления увеличивается незначи-

тельно, и при производительности рециркуляционных установок, указанной в табл. 3, а также в условиях роста производительности и напора ПГВУ Восточного направления рабочая точка ПГВУ Западного направления выходит за границы рабочей области. Для того, чтобы вывести параметры ПГВУ Западного направления в зону устойчивой работы, необходимо увеличить ее производительность, это приводит к снижению производительности рециркуляционных установок. Таким образом, путем поэтапного моделирования стационарного воздухораспределения определены параметры работы рециркуляционных установок, позволяющие обеспечить рабочие зоны требуемым количеством воздуха при стабильной работе ПГВУ (табл. 4).

Вариант 4

Результаты расчетов показали, что коэффициент рециркуляции для Западного и Северного направлений составляет 61,5%. Однако максимальная производительность рециркуляционной установки на Главном Восточном направлении позволяет обеспечить только 37,4% рециркуляции, поэтому далее выполним расчет и моделирование воздухораспределения при параллельном размещении двух рециркуляционных установок в одной рециркуляционной сбойке на Главном Восточном направлении для увеличения количества повторно используемого воздуха.

Результат моделирования показал, что коэффициент рециркуляции для Восточ-

Таблица 4

Параметры работы РУ

Work process-related parameters of recirculation installation

Направление	Производительность, м ³ /мин	Напор, Па
Восточное направление	1684	1084
Западное направление	1188	475
Северное направление	2033	280

Таблица 5

Параметры работы РУ при применении двух агрегатов на Восточном направлении
Work process-related parameters of recirculation installation on application of two assemblies in the East line

Направление	Производительность, м ³ /мин	Напор, Па
Восточное направление	3324	1096
Западное направление	1417	365
Северное направление	2201	330

ного, Западного и Северного направлений составляет 70,6%, 73,4% и 66,7% соответственно при той же частоте вращения рабочего колеса ШВУ, как и в

предыдущем варианте. Данный вариант проветривания характеризуется большими капитальными затратами по сравнению с предыдущими за счет использова-

Таблица 6

Параметры работы РУ при размещении их в конце направлений
Work process-related parameters of recirculation installation with assemblies placed at the ends of two lines

Направление	Производительность, м ³ /мин	Напор, Па
Восточное направление	2372	559
Западное направление	1513	311
Северное направление	2179	156

Таблица 7

Параметры работы ПГВУ и РУ по вариантам проветривания
Work process-related parameters of underground installation of main fans and recirculation installation per ventilation scenarios

Параметр		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4	Вариант 5	
РУ	Запад	Н, Па	260	243	475	356	311
		Q, м ³ /мин	1676	1676	1188	1417	1513
	Север	Н, Па	262	130	280	330	156
		Q, м ³ /мин	2917	2878	2033	2201	2179
	Восток	Н, Па	1151	584	1084	1096	559
		Q, м ³ /мин	4200	3706	1684	3324	2372
ПГВУ	Запад	Н, Па	1465	1566	1092	696	712
		Q, м ³ /мин	351	351	3845	3226	3113
		Н, кВт	— *	— *	83,3	43,6	43,9
	Восток	Н, Па	3190	3286	1858	1447	1219
		Q, м ³ /мин	1263	732	5909	4160	5018
		Н, кВт	— *	46,8	210,2	123,5	118,1
Суммарное энергопотребление		Рабочие точки ПГВУ выходят за границы рабочей области		305,9	289,5	237,4	

ния большего количества вентиляторов для организации рециркуляционного проветривания.

Вариант 5

Рассмотрим вариант размещения рециркуляционных установок на базе вентилятора ВМ-12 в конце Главных направлений перед началом зоны ведения очистных работ. Модельные параметры работы РУ представлены в табл. 6.

При размещении рециркуляционных установок ШВУ-12А в конце направлений все рабочие зоны обеспечиваются требуемым количеством воздуха. Результат моделирования показал, что коэффициент рециркуляции для Восточного, Западного и Северного направлений составляет 58,3%, 78,2% и 72% соответственно. По результатам выполненных расчетов и моделирования приведен сравнительный анализ вариантов проветривания рудника (табл. 7) с учетом обеспечения устойчивости проветривания и энергоэффективности при перспективном развитии горных работ. Анализ результатов табл. 7 показал, что

вариант 5 является наилучшим с точки зрения энергоэффективности обеспечения устойчивой работы ПГВУ.

Заключение

Анализ проведенных исследований показал необходимость учета не только взаимного аэродинамического влияния ПГВУ Западного и Восточного направлений, но и рециркуляционных установок. Расчеты выполнены путем многовариантного моделирования воздухораспределения в модели вентиляционной сети. На основании проведенных исследований определены параметры работы ПГВУ, рециркуляционных установок и оптимальные места их размещения с учетом обеспечения стабильной работы всех вентиляторных установок при их взаимном влиянии и при условии минимизации потребляемой мощности. Корректность результатов моделирования подтверждена натурными исследованиями. Результаты работы легли в основу разработки проекта проветривания рудника при перспективном развитии горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *De Souza E.* Improving the energy efficiency of mine fan assemblages // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. Pp. 1092–1097.
2. *Allen C. L., Tran T. T.* Ventilation-on-demand control system's impact on energy savings and air quality / *Proceedings CIM, Montreal*. 2011. Pp. 1–9.
3. *Wempen J. M.* Characterization of air recirculation in multiple fan ventilation systems. Department of Mining Engineering the University of Utah. 2012.
4. *Flores V., Arauso L., Jara J., Raymundo C.* Optimized ventilation model to improve operations in polymetallic mines in Peru / *Proceedings of the 4th Brazilian Technology Symposium (BTSym'18)*. 2019. Pp. 515–522.
5. *Казаков Б. П., Мальцев С. В., Семин М. А.* Способ оптимизации параметров работы нескольких главных вентиляторных установок для проектирования энергоэффективных режимов проветривания рудников сложной топологии // *Известия высших учебных заведений. Горный журнал*. — 2017. — № 1. — С. 101–108.
6. *Мальцев С. В.* Определение оптимальных параметров систем рудничной вентиляции сложной топологии по критерию минимизации потребляемой мощности / *Стратегия и процессы освоения георесурсов. Сборник научных трудов. Вып. 14.* — Пермь, 2016. — С. 273–277.

7. Шонин О.Б., Пронько В.С. Повышение энергетической эффективности главных вентиляторных установок шахт на основе многоцелевой системы управления частотно-регулируемым приводом // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2014. — № 2(195). — С. 49–57.

8. Пучков Л.А., Бахвалов Л.А. Методы и алгоритмы автоматического управления проветриванием угольных шахт. — М.: Недра, 1992. — 399 с.

9. Цой С.В. Автоматическое управление вентиляционными системами шахт. — Алмата: Наука, 1975. — 366 с.

10. Местер И.М., Засухин И.Н. Автоматизация контроля и регулирования рудничного проветривания. — М.: Недра, 1974. — 240 с.

11. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff // *Applied Energy*. 2015. Vol. 146(C). Pp. 65–73.

12. Круглов Ю.В., Левин Л.Ю. Основы построения оптимальных систем автоматического управления проветриванием подземных рудников // Известия Тульского государственного университета. Науки о земле. — 2010. — № 2. — С. 104–109.

13. Круглов Ю.В., Семин М.А. Совершенствование алгоритма оптимального управления проветриванием вентиляционных сетей сложной топологии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. — 2013. — № 9. — С. 106–115.

14. Казаков Б.П., Мальцев С.В., Семин М.А. Разработка способов повышения эффективности проветривания рудников сложной топологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 4. — С. 51–58.

15. Накаряков Е.В., Ключкин Ю.А. Обеспечение устойчивости работы параллельно установленных осевых вентиляторов в системе автоматического управления проветриванием // Проблемы разработки углеводородных и рудных полезных ископаемых. — 2017. — № 1. — С. 382–385.

16. Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В., Семин М.А. Автоматизированная обработка данных воздушно-депресссионной съемки для построения корректной математической модели вентиляционной сети рудников // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. — 2016. — № 1. — С. 22–30. **VIAS**

REFERENCES

1. De Souza E. Improving the energy efficiency of mine fan assemblages. *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. Pp. 1092–1097.

2. Allen C.L., Tran T.T. Ventilation-on-demand control system's impact on energy savings and air quality. *Proceedings CIM, Montreal*. 2011. Pp. 1–9.

3. Wempen J.M. *Characterization of air recirculation in multiple fan ventilation systems*. Department of Mining Engineering the University of Utah. 2012.

4. Flores V., Arauso L., Jara J., Raymundo C. Optimized ventilation model to improve operations in polymetallic mines in Peru. *Proceedings of the 4th Brazilian Technology Symposium (BTSym'18)*. 2019. Pp. 515–522.

5. Kazakov B.P., Mal'tsev S.V., Semin M.A. Optimization of operating conditions of a few main fan installations in energy-efficient ventilation design for mines of complex topology. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2017, no 1, pp. 101–108. [In Russ].

6. Mal'tsev S.V. Optimization of complex topology mine ventilation systems by minimized energy input criterion. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov*. Sbornik nauchnykh trudov [Strategy and Processes of Development of Georesources: Scientific Proceedings], Issue 14. Perm, 2016, pp. 273–277. [In Russ].

7. Shonin O.B., Pron'ko V.S. Improvement of energy efficiency of mine installations of main fanes based on multi-function variable frequency drive control. *Nauchno-tekhnicheskie*

vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. 2014, no 2(195), pp. 49–57. [In Russ].

8. Puchkov L.A., Bakhvalov L.A. *Metody i algoritmy avtomaticheskogo upravleniya provetrivaniem ugol'nykh shakht* [Methods and algorithms of automatic ventilation control in coal mines], Moscow, Nedra, 1992, 399 p.

9. Tsoy S.V. *Avtomaticheskoe upravlenie ventilyatsionnymi sistemami shakht* [Automatic ventilation control in mines], Alma-Ata, Nauka, 1975, 366 p.

10. Mester I.M., Zasukhin I.N. *Avtomatizatsiya kontrolya i regulirovaniya rudnichnogo provetrivaniya* [Automation of control and adjustment of mine ventilation], Moscow, Nedra, 1974, 240 p.

11. Chatterjee A., Zhang L., Xia X. Optimization of mine ventilation fan speeds according to ventilation on demand and time of use tariff. *Applied Energy*. 2015. Vol. 146(C). Pp. 65–73.

12. Kruglov Yu. V., Levin L. Yu. Optimization principles for automatic ventilation control in underground mines. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta, Nauki o zemle*. 2010, no 2, pp. 104–109. [In Russ].

13. Kruglov Yu.V., Semin M.A. Improvement of optimized ventilation algorithm for complex topology ventilation networks. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*. 2013, no 9, pp. 106–115. [In Russ].

14. Kazakov B.P., Mal'tsev S.V., Semin M.A. Methods of ventilation efficiency improvement in mines of complex topology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no 4, pp. 51–58. [In Russ].

15. Nakaryakov E. V., Klyukin Yu.A. Stability of paralleled operation of axial fans in the system of automatic ventilation control. *Problemy razrabotki uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopaemykh*. 2017, no 1, pp. 382–385. [In Russ].

16. Kazakov B.P., Isaevich A.G., Mal'tsev S.V., Semin M.A. Automated processing of air depression survey data for correct mathematical modeling of mine ventilation network. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Gornyy zhurnal*. 2016, no 1, pp. 22–30. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Казakov Борис Петрович¹ — д-р техн. наук,
главный научный сотрудник, e-mail: aero_kaz@mail.ru,

Гришин Евгений Леонидович¹ — канд. техн. наук,
заведующий сектором, e-mail: aereoavg@mail.ru,

Трушкова Надежда Анатольевна¹ — инженер,
e-mail: aero.nadezhda@gmail.com,

¹ Пермский федеральный исследовательский центр УрО РАН
(ПФИЦ УрО РАН), филиал ГИ УрО РАН.

Для контактов: Трушкова Н.А., e-mail: aero.nadezhda@gmail.com.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

B.P. Kazakov¹, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher, e-mail: aero_kaz@mail.ru,

E.L. Grishin¹, Cand. Sci. (Eng.), Head of Sector, e-mail: aereoavg@mail.ru,

N.A. Trushkova¹, Engineer, e-mail: aero.nadezhda@gmail.com,

¹ Perm Federal Research Center, Ural Branch of Russian Academy
of Sciences (PFRC UB RAS), Mining Institute of Ural Branch
of Russian Academy of Sciences, 614007, Perm, Russia.

Corresponding author: N.A. Trushkova, e-mail: aero.nadezhda@gmail.com.

Получена редакцией 06.04.2020; получена после рецензии 02.09.2020; принята к печати 10.01.2021.

Received by the editors 06.04.2020; received after the review 02.09.2020; accepted for printing 10.01.2021.