

6. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опубл. 20.02.2015. – 1 с.
7. Щербань А.Н., Кремнёв О.А. Научные основы расчёта и регулирования теплового режима глубоких шахт: в 2-х т. – Киев: Изд-во АН УССР, 1959. – Т. 1. – 430 с
8. Воропаев А.Ф. Управление тепловым режимом в глубоких шахтах: – М.: Госгортехиздат, 1961. – 247 с.
9. Гендлер С.Г. Тепловой режим подземных сооружений: [учеб. пособие]. – Л.: ЛГИ, 1987 – 102 с.: ил.
10. МР 2.2.7.2129-06. Режимы труда и отдыха работающих в холодное время на открытой территории или в неотапливаемых помещениях: утв. Гл. гос. сан. врачом РФ 19.09.2006. – 20 с.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2022.3.13

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ РУДНИКА НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГОРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Е.Г. Кузьминых, С.В. Мальцев  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В статье рассмотрены способы повышения энергоэффективности системы вентиляции проектируемого рудника по отработке запасов медно-никелевых руд. Произведено математическое моделирование предлагаемых способов в программе Аэросеть. Выполнена оценка снижения энергозатрат на системе вентиляции в случае реализации одного из способов.

**Ключевые слова:** проектируемый рудник, повышение энергоэффективности, энергозатраты, последовательное проветривание, рециркуляция, вентиляция по требованию.

### Введение

В настоящее время увеличивающиеся темпы экономического развития стран и повышенный спрос на сырьевые ресурсы ставят перед горными предприятиями задачи повышения объемов добычи полезных ископаемых и ввода в эксплуатацию новых запасов месторождений полезных ископаемых. В связи с этим отработка новых месторождений должна быть экономически целесообразной. Себестоимость добычи полезного ископаемого складывается из затрат на выполнение технологических процессов. При этом стоимость готовой продукции существенным образом зависит от выбора системы разработки месторождения.

В зависимости от принятой системы разработки проветривание рудника является одним из наиболее энергозатратных процессов в технологии добычи полезного ископаемого. На стадии проектирования горного предприятия система вентиляции должна обеспечивать безопасные условия труда горнорабочих, а также иметь минимально-возможные энергозатраты на проветривание горных выработок в силу большой продолжительности работы горного предприятия [1, 2].

Определить параметры работы системы вентиляции на стадии проектирования горного предприятия невозможно без использования математического моделирования. Кроме того, использование современных программных комплексов по расчету вентиляции на основании топологии модели вентиляционной сети рудника позволяет избежать ошибок на стадии проектирования, а также обеспечить наибольшую энергоэффективность ее работы.

### Основная часть

При проектировании системы вентиляции подземного рудника предлагается решать несколько основных задач, от которых будут зависеть основные параметры работы вентиляционного оборудования и применяемое оборудование для добычи и транспортировки полезного ископаемого. К таким задачам можно отнести следующие:

- обеспечение проектной производительности рудника по условиям вентиляции;
- определение параметров работы главных вентиляторных и калориферных установок;
- определение максимального количества воздуха в рамках пропускной способности воздухоподающих и вентиляционных выработок в соответствии с требованиями «правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [3] (далее «правил безопасности...»);
- определение проблемных мест в вентиляционной сети;
- обеспечение энергоэффективности системы вентиляции.

Решение задачи обеспечения производительности рудника по условиям вентиляции отталкивается от основных параметров вскрывающих выработок, системы разработки и типов техники, планируемых для транспортировки горной породы и полезного ископаемого к местам выдачи на поверхность.

На начальном этапе при заданных параметрах количества рабочих зон и типе применяемой техники выполняется расчет требуемого количества воздуха с учетом коэффициентов запаса воздуха на утечки определяется необходимое количество воздуха для проветривания горных работ. На следующем этапе при известных проектных параметрах вскрывающих выработок производится проверка по условию соответствия скорости движения воздуха в соответствии с требованиями п. 152 «Правил безопасности...» [3]. В случае превышения скорости движения воздуха во вскрывающих выработках может быть скорректировано сечение воздухоподающих и вентиляционных выработок, рассмотрены варианты замены используемого горно-шахтного оборудования с двигателями внутреннего сгорания на технику с электроприводом, либо корректировка планов добычи полезного ископаемого и снижение количества техники, занятого в одно-временной работе.

В случае обеспечения допустимых скоростей движения воздуха во вскрывающих выработках производится математическое моделирование воздухораспределения в модели вентиляционной сети, соответствующей периоду выхода на проектную мощность и наибольшему удалению рабочих зон.

По результатам моделирования определяются параметры работы главных вентиляторных и калориферных установок, места расположения средств регулирования потоков воздуха, а также определяется необходимость размещения дополнительного вентиляционного оборудования для проветривания труднопроветриваемых рабочих зон.

В большинстве случаев при проектировании системы вентиляции рекомендуется рассматривать способы повышения ее энергоэффективности. К таким способам могут относиться [4, 5]:

- корректировка количества или сечения основных воздухоподающих выработок по результатам анализа распределения энергозатрат в вентиляционной сети;
- применение частично-повторного использования воздуха;
- применения последовательного проветривания рабочих зон;
- применение систем «вентиляции по требованию», включающие динамический расчет требуемого количества воздуха и автоматическое регулирование воздушных потоков в системе вентиляции в комплексе с главными вентиляторными установками.

### Результаты

При проектировании системы вентиляции одного из медно-никелевых рудников рассмотрены вышеперечисленные способы повышения энергоэффективности и выданы рекомендации по дальнейшей детализации прорабатываемых вариантов с целью снижения капитальных и эксплуатационных затрат. В качестве программного комплекса расчета вентиляционных сетей использовалась программа «АэроСеть» [6].

В качестве исходных данных для расчетов принимались параметры по отработке запасов полезного ископаемого, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для проектирования системы вентиляции

	Очистные работы	Проходческо-нарезные работы	Горно-капитальные работы
Количество забоев	24 шт.	18 шт.	2 шт.
Тип погрузочно-доставочных машин	LH-514e / LH-514	LH-514	LH-514
Количество погрузочно-доставочных машин	10 шт.	7 шт.	2 шт.
Тип самосвалов		AD-30	
Количество самосвалов		5 шт.	
Производительность рудника		7 млн. тонн в год	

### Анализ проектных сечений вскрывающих горизонт горных выработок по критерию энергозатрат на проветривание

На основании предоставленных исходных данных по расположению рабочих зон и типу применяемой техники выполнены расчеты требуемого количества воздуха для проветривания добычных участков проектируемого рудника. Выполнено многовариантное математическое моделирование воздухораспределения на разработанной топологии модели вентиляционной сети. По результатам численных расчетов все потребители рудника обеспечены необходимым количеством воздуха, а также определены рабочие параметры вентиляционного оборудования. На рисунке 1 представлено распределение энергозатрат для варианта расчетов без применения способов повышения энергоэффективности системы вентиляции.

Распределение энергозатрат, представленное на рисунке 1, показывает, что в модели вентиляционной сети присутствуют участки с повышенными энергозатратами на проветривание горных выработок. Данные выработки являются вертикальными стволами, а также участки выработок, по которым происходит движение основных потоков воздуха от воздухоподающего ствола, а также выработки сбора общей исходящей струи с вентиляционных горизонтов. В качестве мероприятий по устранению участков с повышенными энергозатратами может служить увеличение сечения данных выработок, либо проходка дополнительных выработок, что позволит снизить общие энергозатраты на проветривание рудника. Кроме того, на стадии проектирования могут быть приняты мероприятия по снижению аэродинамического сопротивления вертикальных стволов [7, 8], что также позволит оптимизировать энергозатраты на проветривание рудника.

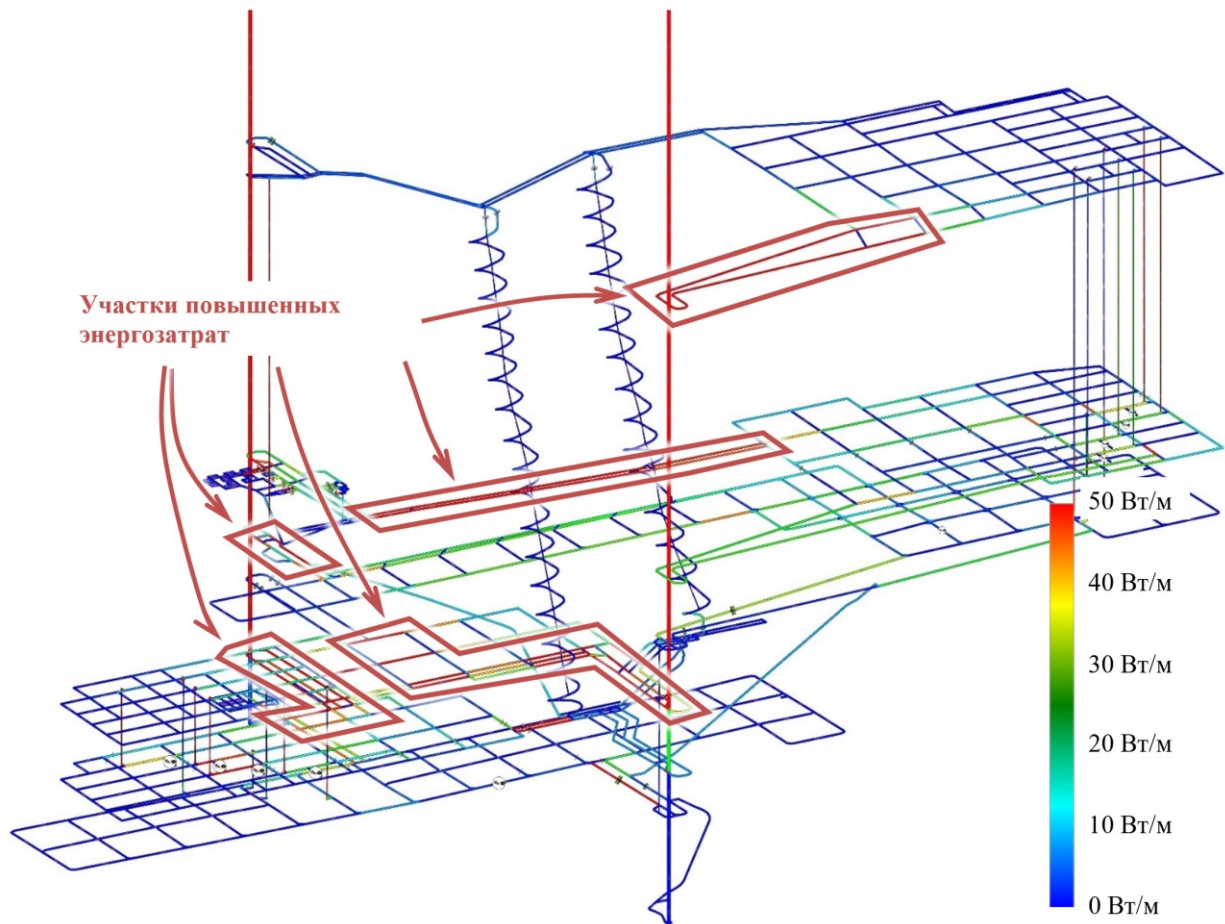


Рис. 1. Распределение энергозатрат в вентиляционной сети

Данные мероприятия позволят снизить энергозатраты на проветривание данного участка на 18%, а также снизить требуемый напор проектируемой главной вентиляционной установки на 15,7%, относительно варианта без мероприятий.

### Частично-повторное использование воздуха

Системы частично-повторного использования воздуха на рудных месторождениях в настоящее время не нашли широкого применения в силу особенностей залегания полезного ископаемого и, как следствие применяемых систем разработки, в отличие от пластовых месторождений, например калийных солей. Применение системы частично-повторного использования воздуха на калийных месторождениях показывает значительный экономический эффект от применения рециркуляции [4, 9, 10].

Рециркуляционное проветривание рассмотрено для проектируемой топологии горных выработок. Принципиальные схемы систем частично-повторного использования воздуха представлены на рисунке 2.

Принципиальные отличия двух предложенных вариантов заключаются в масштабе контура рециркуляции и необходимых дополнительных мероприятиях по организации частично-повторного использованного воздуха. Участковая рециркуляция организована за счет использования выработок вентиляционно-посадочного горизонта и подачи исходящего воздуха по вентиляционным восстающим в места общей свежей струи. Общерудничная рециркуляция подразумевает проходку дополнительной выработки, через которую общая исходящая струя воздуха, разбавленная всеми утечками воздуха, будет подаваться в воздухоподающий ствол.

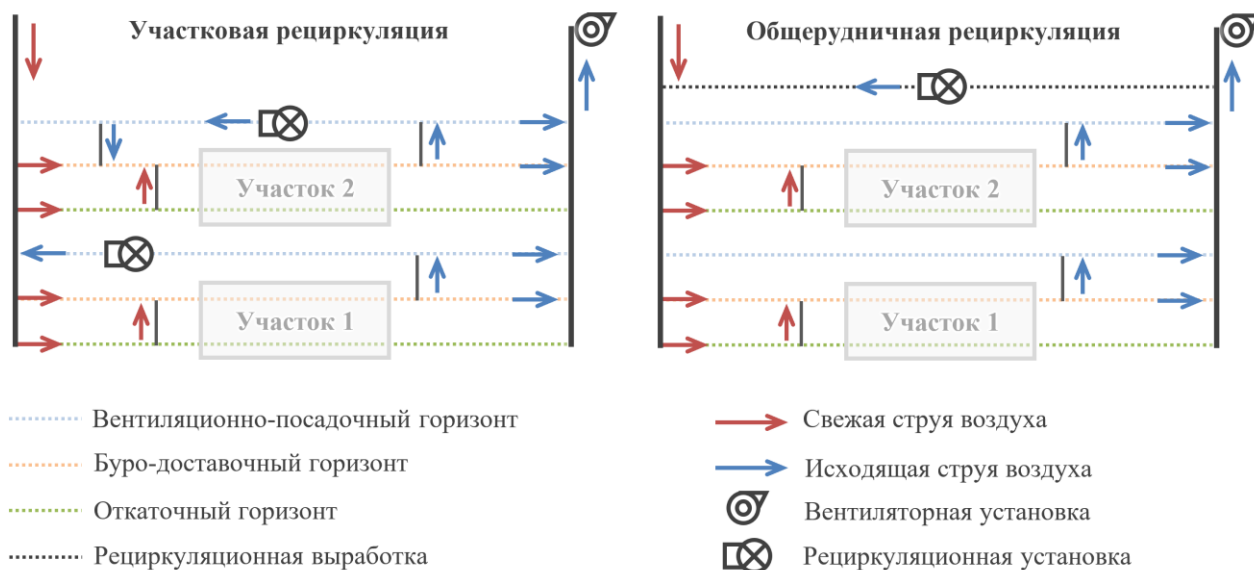


Рис. 2. Принципиальные схемы частичного повторного использования воздуха

В связи с этим допустимый объем воздуха, который может быть направлен на повторное использование, будет различным. В случае общерудничной рециркуляции он составляет больше, чем при участковой. Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты применения систем  
частичного повторного использования воздуха

Параметр	Участковая рециркуляция	Общерудничная рециркуляция
Энергопотребление вентиляторных установок	4 402 кВт	4 763 кВт
Снижение энергопотребления	37 %	23 %
Суммарная тепловая мощность	67,8 МВт	53,1 МВт
Снижение тепловой мощности	15 %	33 %
Объем дополнительных выработок	26 902 м <sup>3</sup>	92 418 м <sup>3</sup>

По результатам многовариантного численного моделирования можно сделать вывод, что на рассматриваемом примере более эффективно применение участковой рециркуляции воздуха. Кроме того, для организации участковой рециркуляции потребуются меньшие типоразмеры вентиляторных установок и меньшие капитальные затраты на проходку дополнительных выработок.

В настоящее время применение частичного повторного использования воздуха не имеет прямого запрета «Правилами безопасности...», как и разрешения на применение. С целью организации данного мероприятия потребуется детальная проработка организационных и технических мероприятий, а также разработка обоснования безопасности опасного производственного объекта.

### Последовательное проветривание рабочих зон

В настоящее время последовательное проветривание рабочих зон запрещено «Правилами безопасности...» [3], но опыт обследования вентиляционных систем рудных месторождений показывает, что на общей исходящей струе во всех рудниках отсутствует превышение концентраций ядовитых газов. В связи с этим предлагается использование последовательного проветривания рабочих зон для повышения энергоэффективности системы вентиляции.

При организации последовательного проветривания рабочих зон предлагается поддерживать выработки, а также выработки, в которых ведутся вспомогательные технологические операции крепления или бурения, проветривать последовательно с рабочими зонами. Данный подход позволит не учитывать данные выработки в общем расчете количества воздуха для проветривания рудника.

При рассмотрении вариантов организации последовательного проветривания проведено моделирование газораспределения в рудничной вентиляционной сети при работе техники с ДВС в нескольких забоях в одном выемочном блоке. В качестве источников газовыделений от работы техники с ДВС были приняты экологические нормы выбросов техники Tier 4/ Stage IV. В соответствии с экологическими показателями расчет требуемого количества воздуха для разбавления компонентов выхлопных газов осуществляется по фактору угарного газа, как определяющему по выбросам. Распределение концентрации газа CO одного из выемочных участков приведено на рисунке 3.

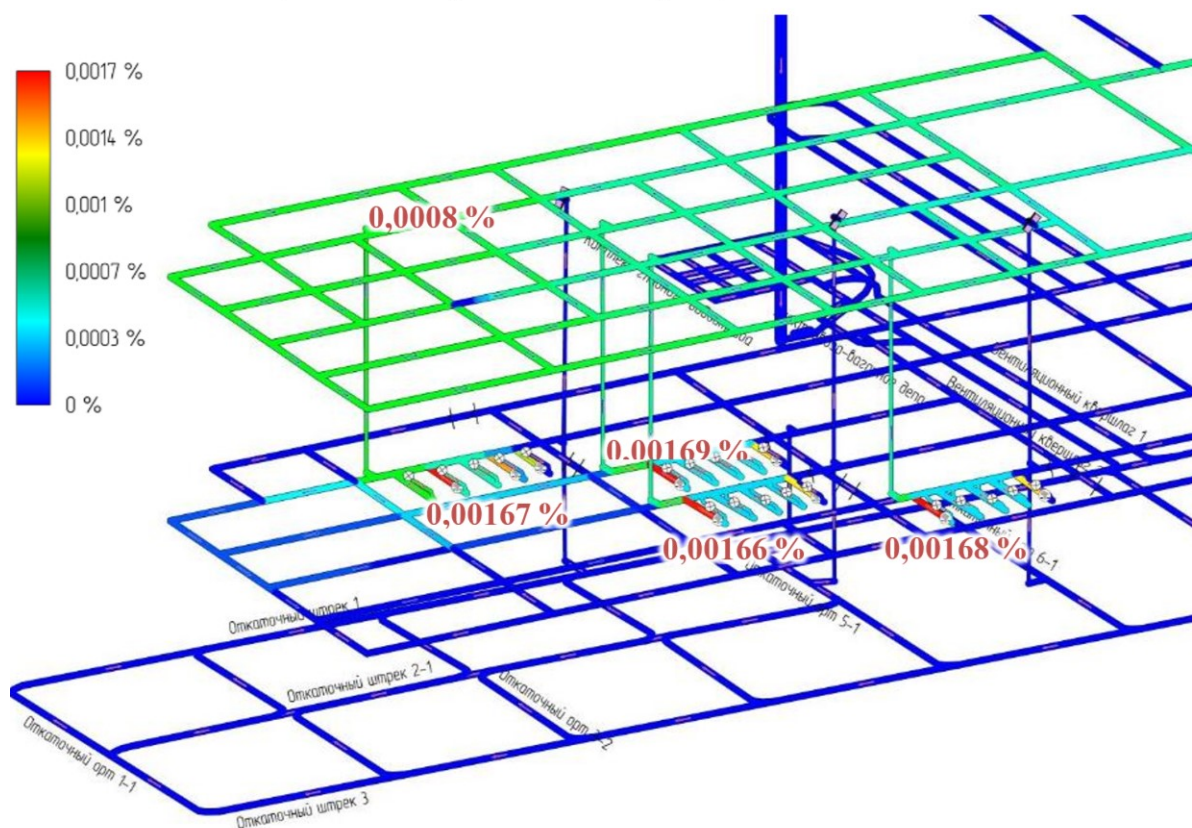


Рис. 3. Распределение концентраций газа CO выемочного участка 1

Последовательное проветривание рабочих зон в пределах выемочного блока энергопотребление главной вентиляторной установки снизится на 39%.

Предлагаемые способы повышения энергоэффективности за счет применения последовательного проветривания рабочих зон имеют свои особенности на стадии проектирования. К таким особенностям в настоящее время можно отнести запрет на использование данного способа требованиям «Правил безопасности...» [3]. Однако при проработке данных вариантов и разработке обоснования безопасности опасного производственного объекта могут являться способом повышения эффективности системы вентиляции.

### **Вентиляция по требованию**

Вентиляция «по требованию» является одним из перспективных способов управлением вентиляционных систем, обеспечивающих оптимальное регулирование и эффективное использование подаваемого воздуха для проветривания горных работ. Суть вентиляции по требованию заключается в организации системы автоматического управления проветриванием и разработки методики расчета требуемого количества воздуха с учетом динамического управления воздухораспределением и определении максимального фактора [1, 2].

На стадии расчета определяется необходимое количество воздуха для проветривания рабочих забоев, после чего формируется база уставок для горных выработок по расчетным факторам. Для организации динамического управления воздухораспределением в подземных горных выработках должна также располагаться система позиционирования горнорабочих и самоходной техники с двигателями внутреннего сгорания. При этом система позиционирования фиксирует заезд техники с ДВС в рабочую зону и за счет автоматического управления регулирует производительность вентилятора местного проветривания по заданной уставке. После завершения работ в забое ВМП снижают производительность и выработка проветривается по минимальной скорости движения воздуха.

Динамический расчет необходимого количества воздуха в совокупности с системой автоматического управления проветриванием рудника позволит снизить энергозатраты на работе главной вентиляторной установки в межсменные перерывы, а также оптимизировать подачу главной вентиляторной установки в соответствии с фактически проводимыми работами в руднике.

По результатам моделирования снижение энергозатрат на проветривание рудника может достигать 65%, а также 33% снижения тепловой мощности калориферных установок.

### **Заключение**

Сравнение энергозатрат на проветривание при применении дополнительных средств повышения энергоэффективности систем вентиляции приведено на рисунке 4.

Вентиляция по требованию является одним из наиболее энергоэффективных способов снижения энергозатрат на проветривание горных работ при одинаковых условиях используемой техники. Кроме того, проработка вариантов применения последовательного проветривания рабочих зон или частично-повторного использования воздуха на уровне участковых систем также является достаточно эффективным способом снижения энергозатрат.

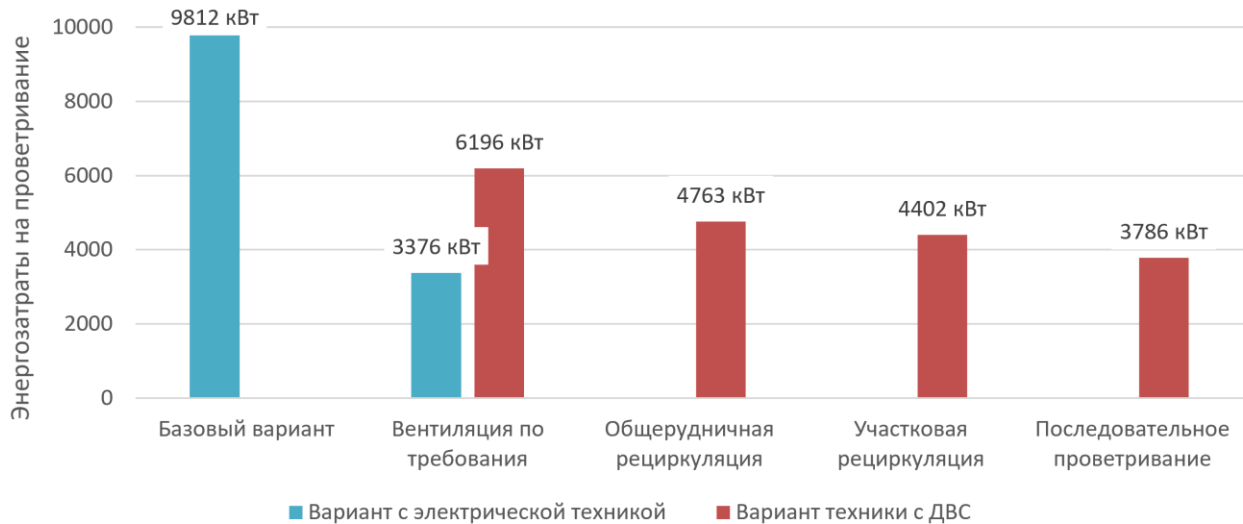


Рис. 4. Сравнение энергозатрат на проветривание рудника

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ в рамках соглашения по государственному заданию № 075-03-2021-374 от 29 декабря 2020 г. (рег. номер 122012000396-6).*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Гришин Е.Л., Накаряков Е.В., Трушкова Н.А., Санникович А.Н. Опыт внедрения систем динамического управления проветриванием рудников // Горн. журн. – 2018. – № 8. – С. 103-108.
3. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»: утв. 08.12.2020, № 505, действуют с 01.01.2021 г. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).
4. Зайцев А.В., Трушкова Н.А. Исследование рециркуляционного проветривания при наличии источника газовыделения в рабочей зоне и внутренних утечек воздуха // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2022. – № 3. – С. 34-46. – DOI: 10.25018/0236\_1493\_2022\_3\_0\_34.
5. Левин Л.Ю., Семин М.А., Клюкин Ю.А., Киряков А.С. Обоснование скорости движения воздуха в вентиляционных каналах // Горн. журн. – 2016. – № 3. – С. 68-72.
6. Аналитический комплекс «АэроСеть»: программа для ЭВМ: свидетельство о гос. регистрации № 2015610589 / Зайцев А.В., Казаков Б.П., Кашников А.В., Кормщиков Д.С., Круглов Ю.В., Левин Л.Ю., Мальков П.С., Шалимов А.В.; заявитель и правообладатель ГИ УрО РАН – № 2014613790; заявл. 24.04.2014; зарегистрировано 14.01.2015; опубл. 20.02.2015. – 1 с.
7. Мальцев С.В., Семин М.А., Кормщиков Д.С. Метод определения коэффициентов аэродинамического сопротивления шахтных стволов медно-никелевых рудников // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2020. – №6. – С. 170-178. – DOI: 10.15372/FTPRPI20200615.
8. Казаков Б.П., Исаевич А.Г., Мальцев С.В. Особенности определения аэродинамических сопротивлений глубоких шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 164-168.
9. 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.
10. Kazakov B., Trushkova N., Shalimov A., Grishin E. On the possibility of using controlled air recirculation in potash and metal mines // International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM: 20<sup>th</sup> SGEM 2020, Bulgaria, Albena, 18-24 August 2020. – V. 2020, № 1.2. – P. 203-210. – DOI: 10.5593/sgem2020/1.2/s03.026.