

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ КАЛИЙНЫХ РУДНИКОВ ПОСРЕДСТВОМ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ КАМЕР СЛУЖЕБНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

А.Е. Суханов, А.Г. Исаевич, Е.Л. Гришин  
*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В настоящее время ведется активная работа, направленная на повышение энергоэффективности всех этапов добычи полезного ископаемого. Одним из энергозатратных процессов является проветривание подземных рудников.

Согласно ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых», камеры служебного назначения должны иметь обособленное проветривание. В данной работе предлагается снизить количество подаваемого в рудник свежего воздуха за счет перевода камер служебного назначения на последовательное проветривание.

**Ключевые слова:** камеры служебного назначения, энергоэффективность, система вентиляции, последовательное проветривание, выхлопные газы, калийные рудники, безопасность.

### Введение

Вентиляторы главного проветривания на подземных рудниках являются одними из самых энергозатратных агрегатов с электроприводом [3]. Связано это с тем, что протяженность подземных горных выработок может составлять несколько сотен километров. Как следствие, для создания такого напора, который сможет преодолеть аэродинамическое сопротивление и доставить свежий воздух в требуемом количестве в самые отдаленные рабочие зоны, необходимо использовать мощные вентиляторные агрегаты.

В настоящее время все горнодобывающие предприятия Российской Федерации стремятся к повышению энергоэффективности всех этапов добычи. Сотрудниками отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН активно ведутся работы по разработке системы вентиляции с безопасным последовательным проветриванием камер служебного назначения (КСН). Данная система проветривания по предварительным расчетам для различных калийных рудников может привести к снижению количества подаваемого в рудник воздуха на 15...30%, как следствие снизить энергозатраты главной вентиляторной установки, а также затраты на воздухоподготовку в зимнее время.

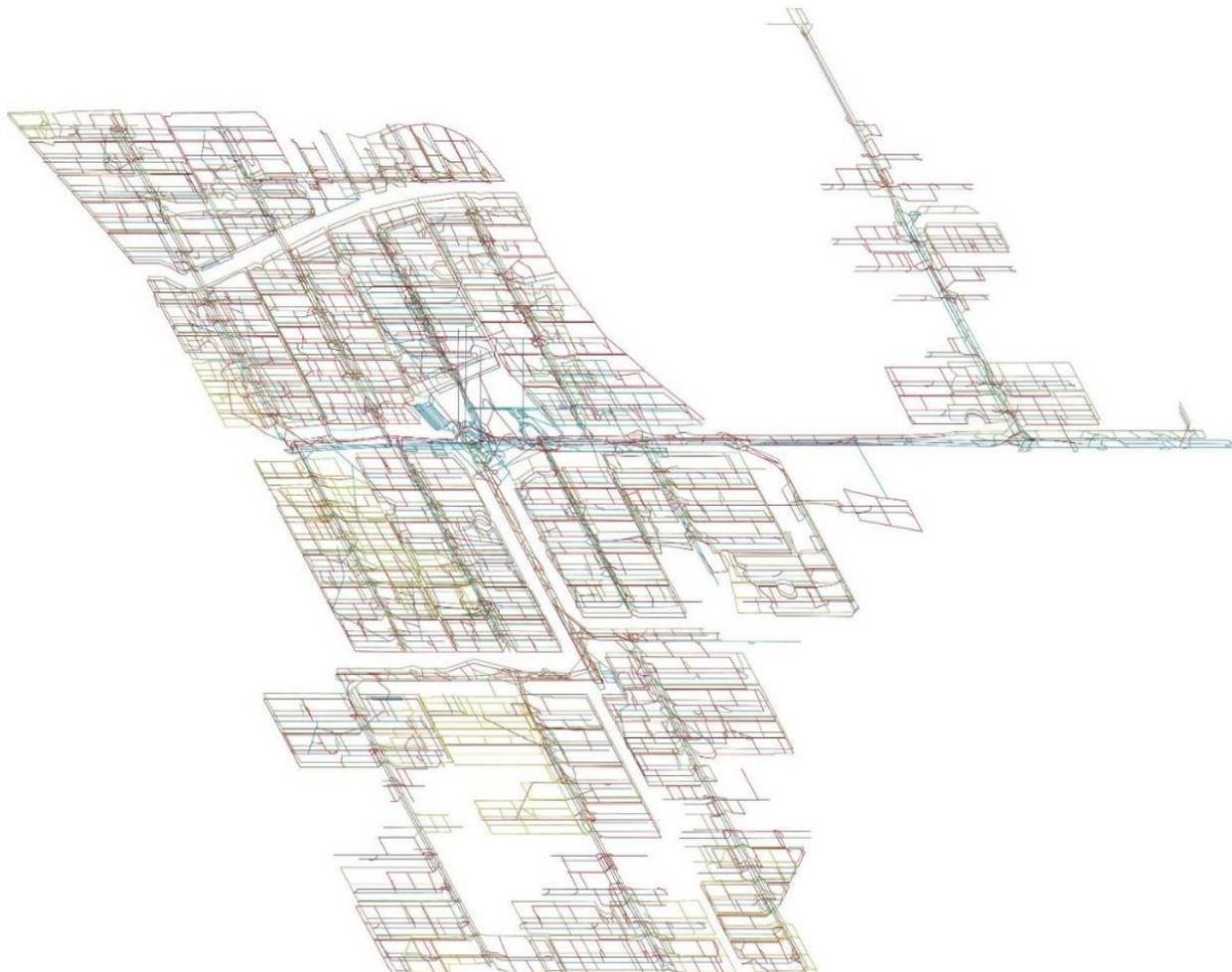
Согласно требованию пункта 153 ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых» [9] КСН должны проветриваться обособленно. Для того, чтобы разработать систему вентиляции с последовательным проветриванием КСН, необходимо произвести научное обоснование о безопасности предлагаемых мероприятий.

### Цели и задачи исследования

Целью данного исследования является обоснование экономической эффективности от реализации системы вентиляции с последовательным проветриванием КСН, а также обоснование безопасности данных мероприятий. Обоснование безопасности разработано посредством проведения натуральных замеров газораспределения и воздухораспределения в подземных горных выработках. Прогнозирование газораспределения и вероятности накопления горных примесей необходимо произвести посредством моделирования в программном комплексе «Аэросеть» [2].

### Объект исследования

Исследования производятся на калийных рудниках Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей. Для данных рудников характерны большая протяженность горных выработок и большое количество рабочих зон. Пример одного из рудников представлен на рисунке 1.



**Рис. 1.** Топология одного из рудников ВМКМС, построенная в программном комплексе «Аэросеть»

Разработка месторождения ведется механизированными комплексами типа «Урал-10», «Урал-20Р», «Универсал-600», «Marietta mf-320», как следствие ведение горных работ характеризуется высокой скоростью продвижения забоев [8]. Данные факторы свидетельствуют о том, что в рудник ежеминутно приходится подавать большие объемы воздуха.

### Проведения газовоздушных съемок и исследование воздухораспределения

На рисунке 2 представлена схема, на которой указано размещение КСН, в которых планируется реализовать последовательное проветривание.

Анализируя схему, становится понятно, что, реализуя последовательное проветривание КСН, можно добиться снижения расхода воздуха на каждое направление рудника. Как альтернативный вариант, можно увеличить количество добычных комплексов на направлениях.

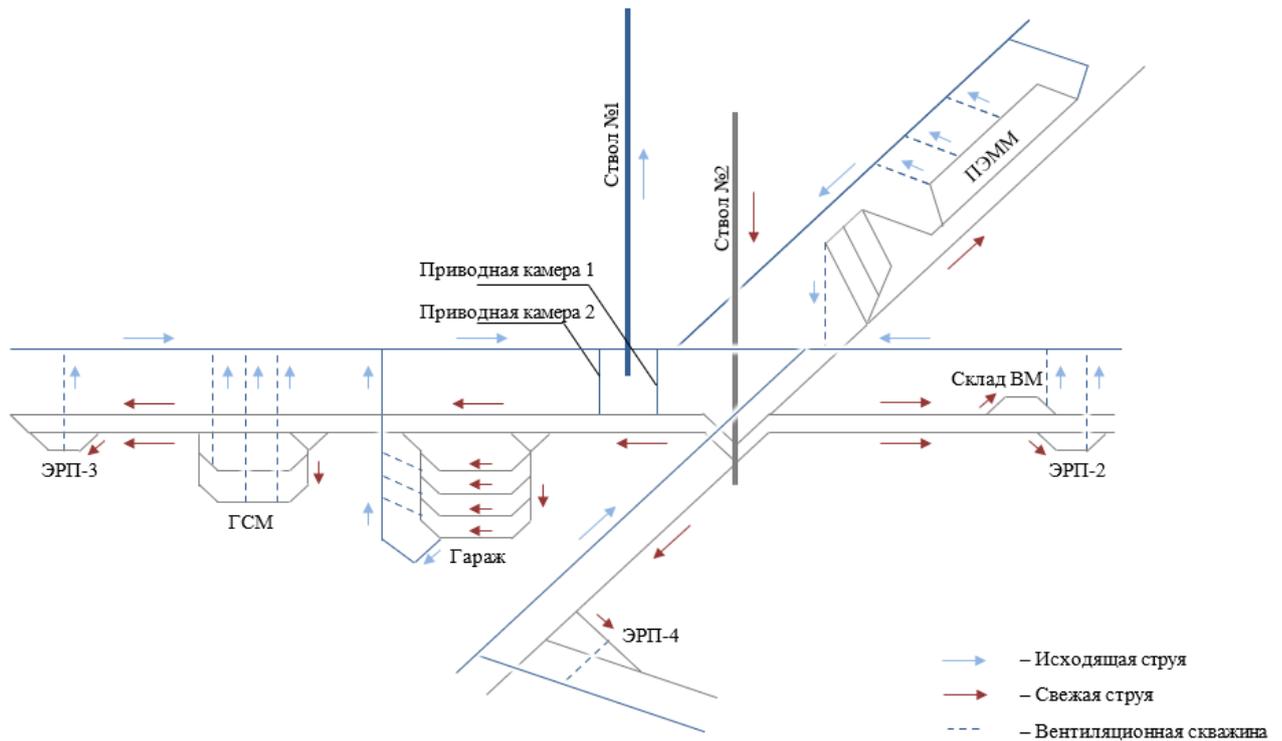


Рис. 2. Упрощённая схема рудника, с расположением КСН

В таблице 1 представлены требуемые расходы воздуха на различные КСН рудника.

Таблица 1

Требуемые расходы воздуха на КСН

Место замера	Требуемый расход
Подземная электромеханическая мастерская (ПЭММ)	642 м <sup>3</sup> /мин
Склад горюче-смазочных материалов (ГСМ)	597 м <sup>3</sup> /мин
Склад взрывчатых материалов (ВМ)	276 м <sup>3</sup> /мин
Приводная камера 1	95 м <sup>3</sup> /мин
Приводная камера 2	95 м <sup>3</sup> /мин
Гараж	816 м <sup>3</sup> /мин
Электрораспределительная подстанция (ЭРП-2)	214 м <sup>3</sup> /мин
Электрораспределительная подстанция (ЭРП-3)	214 м <sup>3</sup> /мин
Электрораспределительная подстанция (ЭРП-4)	114 м <sup>3</sup> /мин

Анализируя таблицу 1, можно сделать вывод, что суммарный расход воздуха, затрачиваемый на КСН, составляет 3063 м<sup>3</sup>/мин. Принимая во внимание такие коэффициенты как:

- коэффициент запаса, учитывающий подземные общерудничные утечки воздуха в выработках околоствольных дворов,
- коэффициент, учитывающий неравномерность распределения воздуха,
- коэффициент запаса, учитывающий внешние утечки воздуха,

- суммарная экономия воздуха при последовательном проветривании данных камер составляет 5160 м<sup>3</sup>/мин.

Для оценки количества поступающего в рудник воздуха, а также его фактического распределения в КСН проведены натурные исследования воздухораспределения.

Цель проведения воздушной съемки – формирование базы данных для разработки актуальной модели расчетной вентиляционной сети шахты, оценки качества вентиляции.

По результатам замеров все рассматриваемые КСН были обеспечены требуемым количеством воздуха. Замеры расходов воздуха производились непосредственно в вентиляционных скважинах КСН, как на воздухоподающем, так и на вентиляционном горизонте. Если проход к скважине был ограничен, то замер производился как можно ближе к ней.

Для определения компонентного состава воздуха, поступающего и удаляющегося из КСН, произведена газоздушная съемка. При изучении газовой обстановки на руднике производился отбор проб рудничного воздуха, а также экспресс-анализ качественного состава. Для экспресс анализа применялись портативные газоанализаторы Drager X-am 2500 и Altair, а также газоопределители химические ГХ-Е. Замеры концентрации газов производились на исходящей воздушной струе, которая, как правило, удаляется по вентиляционным скважинам. Фоновая концентрация в околоствольном дворе равняется нулю. Точки отбора проб и проведения экспресс-анализа в большей степени располагаются непосредственно в скважине. В случае, если подход к скважине был невозможен, натурные исследования производились как можно ближе к скважине со стороны вентиляционных выработок.

При определении компонентного состава воздуха замеры производились по всем ядовитым газам (парам), которые представлены в таблице №2 п.151 ФНиП «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке полезных ископаемых» [9].

Результаты газоздушной съемки показали, что качественное изменение состава воздуха происходит только в тех камерах, где работают самоходные машины, оборудованные двигателем внутреннего сгорания. Как правило, фиксировались газы, такие как оксид углерода СО<sub>2</sub> и окислы азота NO<sub>x</sub>. К таким камерам можно отнести автогараж и склад горюче-смазочных материалов (ГСМ).

В ходе натурных исследований в руднике были созданы наиболее трудные условия для разбавления выхлопных газов автомобилей. Замеры производились в утреннюю смену, когда количество одновременно запущенных автомобилей имеет наибольшее значение. Превышения предельно-допустимых значений были зафиксированы в автогараже и в складе горюче-смазочных материалов, когда самоходное оборудование приезжало на заправку баков топливом. Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты замеров примесей газов в исходящем воздухе из автогаража и склада ГСМ

Место замера	Зафиксированные газы			
	СО		NO <sub>x</sub>	
	Процентное содержание	Величина ПДК	Процентное содержание	Величина ПДК
Автогараж	0,0012 %	0,0017 %	0,0003 %	0,00026 %
Склад ГСМ	0,0002 %		0,00026 %	

Было решено принять к последовательному проветриванию те КСН, в которых не происходит качественное изменение состава воздуха. В то время как для обоснования последовательного проветривания автогаража и склад ГСМ требуется проведение дополнительного моделирования в программе «Аэросеть».

### Математическое моделирование накопления газовых примесей

Стоит отметить, что последовательное проветривание автогаража и склада ГСМ усложняется за счет того, что камеры расположены друг за другом по тракту движения воздушной струи. Это означает, что свежий воздух будет заходить в автогараж, далее будет разбавляться некоторым количеством ядовитых газов, после чего этот же воздух будет поступать в склад ГСМ, где претерпит дополнительное подмешивание ядовитыми примесями. Моделирование газовой обстановки производилось только по оксидам азота  $\text{NO}_x$ , поскольку превышения концентрации были зафиксированы только по данному газу. При моделировании накопления газовых примесей были рассмотрены четыре ситуации:

1. Фактическое распределение газовых примесей, когда и склад ГСМ, и автогараж проветриваются последовательно, результаты представлены на рисунке 3:

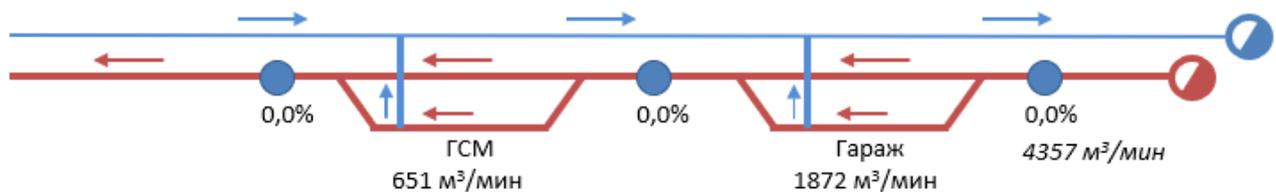


Рис. 3. Распространение газовых примесей при фактическом воздухообращении

В данной ситуации через главную вентиляторную установки проходит 29963 м³/мин. Далее по тексту расчет энергоэффективности будет производиться от данного расхода воздуха. Стоит учитывать, что в дальнейшем расчете экономической выгоды все камеры, в которых не происходит загрязнение воздуха, учтены как последовательно проветриваемые.

На главных воздухоподающих направлениях концентрации ядовитых примесей нулевые, поскольку исходящая струя уходит через скважины на вентиляционные выработки.

2. К последовательному проветриванию принимается только автогараж, склад ГСМ проветривается обособленно, результаты представлены на рисунке 4:

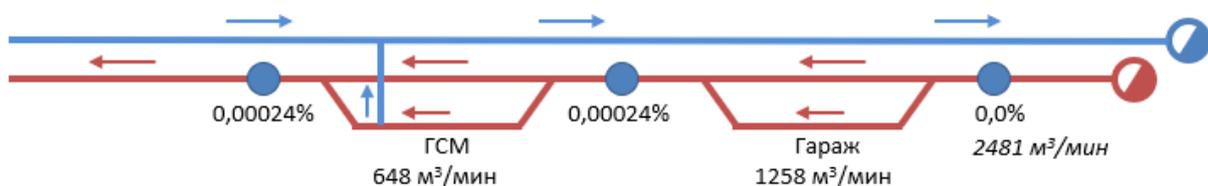


Рис. 4. Распространение газовых примесей при последовательном проветривании только автогаража

При последовательном проветривании только гаража через главную вентиляторную установки проходит 26110 м³/мин, что на 13% меньше предыдущего значения.

Концентрации  $\text{NO}_x$  на главных направлениях близки к значениям ПДК. Данная модельная картина получена при одновременной работе пяти самоходных машин с ДВС в автогараже.

3. К последовательному проветриванию принимается только склад ГСМ, автогараж проветривается последовательно, результаты представлены на рисунке 5:

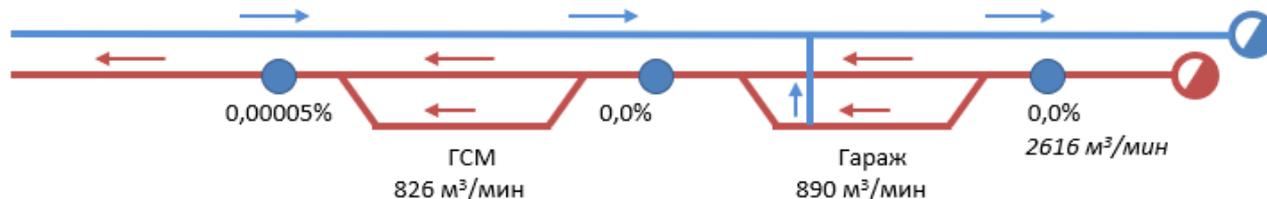


Рис. 5. Распространение газовых примесей при последовательном проветривании только склада ГСМ

Рассматривая последовательное проветривание только склада ГСМ, количество воздуха, проходящее через главный вентилятор, составляет  $26387 \text{ м}^3/\text{мин}$ , что на 12% меньше, чем при фактическом воздухораспределении.

Газовая обстановка на главных воздухоподающих выработках – удовлетворительная, значения концентрации оксидов азота значительно меньше величин ПДК.

4. Полное последовательное проветривание автогаража и склада ГСМ, результаты представлены на рисунке 6:

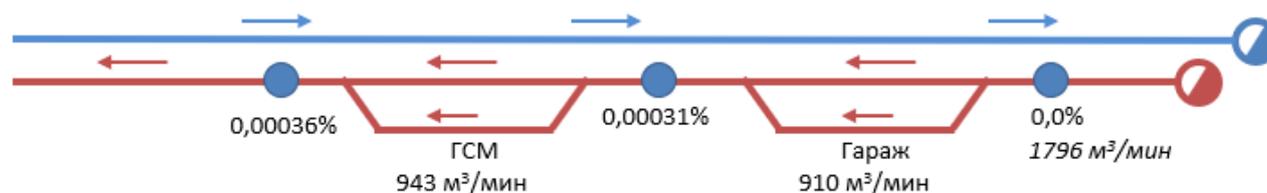


Рис. 6. Распространение газовых примесей при полном последовательном проветривании

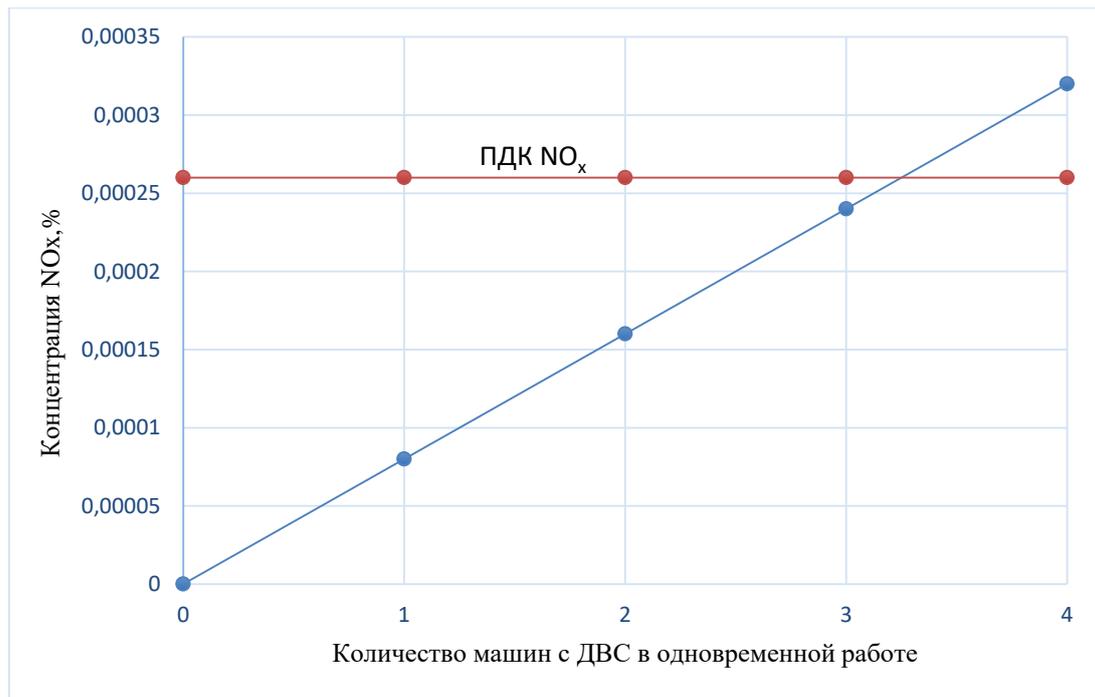
Полное последовательное проветривание всех камер служебного назначения, в том числе склада ГСМ и автогаража позволит снизить расход воздуха до  $24803 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Таким образом, реализуя полное последовательное проветривание всех КСН, можно добиться снижения количества подаваемого воздуха на 17%, что повлечет за собой существенное снижение энергозатрат на работу вентилятора главного проветривания (до 42%).

Анализируя рис. 6, можно видеть, что на главных воздухоподающих выработках фиксируется превышение предельно-допустимых концентраций оксидов азота примерно на 40%. Данная ситуация описывает одновременную работу пяти самоходных машин с ДВС в гараже и одну запущенную машину с ДВС в складе ГСМ.

Таким образом остро возникает вопрос ограничения одновременно работающих самоходных машин с ДВС.

Авторами работы получена зависимость, которая позволяет определить максимальное количество работающих машин на направлении. При расчетах принято допущение: в складе ГСМ уже находится один автомобиль с работающим двигателем внутреннего сгорания. Количество воздуха, подаваемое на направление, принятое к расчету, составляет  $3000 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

Результаты расчетов представлены на рисунке 7:



**Рис. 7.** Зависимость концентрации оксидов азота от количества самоходных машин с ДВС, находящихся в одновременной работе, без учета машины в складе ГСМ

Из рисунка 7 видно, что на направлении в одновременной работе могут находиться 4 самоходных машины, оборудованных ДВС, одна из них, как было описано ранее, находится в складе ГСМ. Количество воздуха, подаваемое на данное направление, составляет  $3000 \text{ м}^3/\text{мин}$ . При этом, увеличивая количество воздуха на направлении, количество машин с ДВС может быть увеличено.

Стоит учитывать, что ограничение одновременно работающих машин с двигателем внутреннего сгорания не всегда положительно сказывается на эффективности производственных процессов. В связи с этим актуальной задачей является разработка организационных мероприятий, которые позволят исключить превышения предельно-допустимых концентраций, не отказываясь при этом от последовательного проветривания КСН.

#### **Разработка мероприятий по недопущению превышения ПДК ядовитых газов**

Одним из таких мероприятий является динамическое управление системой вентиляции КСН в самые загруженные периоды.

Техническое дооснащение системы вентиляции для реализации такого управления проветриванием заключается в следующем:

Главная вентиляционная установка должна быть оснащена частотным преобразователем тока для возможности плавного изменения расходов воздуха, подаваемого в рудник.

Вентиляционные скважины или подходы к ним должны быть оснащены автоматическими вентиляционными дверями.

Выработки, которые будут при последовательном проветривании участвовать в качестве вентиляционных (запасные выходы из КСН), должны быть оснащены автоматическими вентиляционными дверями.

КСН и места их сопряжений с главными выработками должны быть оснащены системами аэрогазового контроля.

На рисунке 8 представлен разработанный алгоритм работы системы управления проветриванием КСН:



Рис. 8. Алгоритм управления проветриванием КСН

В алгоритме, представленном на рисунке 8, показаны две ситуации, которые описывают газовую обстановку:

*Нормальный газовый режим* – подразумевает собой такую газовую обстановку, при которой значений концентраций ядовитых газов в воздухе ниже предельно-допустимых концентраций.

*Режим повышенной газовой нагрузки* – подразумевает собой такую газовую обстановку, когда величины концентраций ядовитых газов становятся выше предельно-допустимых концентраций. Примером такого режима является утренняя развозка, когда смена шахтеров спускается в шахту и машины одновременно начинают выезжать из гаража.

Показания датчиков системы аэрогазового контроля выводятся на информационную панель диспетчеру, а также сотрудникам участка вентиляции. Открытие и закрытие автоматических дверей может быть реализовано как в режиме, так и в ручном режиме.

### Выводы

Тенденция повышения энергоэффективности всех этапов добычи полезного ископаемого стремительно набирает обороты. Одним из таких мероприятий является снижение энергозатрат на проветривание калийных рудников посредством перевода камер служебного назначения на последовательное проветривание.

В данной работе представлены результаты натурных исследований воздухо- и газораспределения в подземных горных выработках. Анализ показал, что камеры делятся на два типа: в первых происходит изменение качественного состава воздуха, во вторых состав воздушной струи не изменяется.

Камеры служебного назначения, в которых работают машины с ДВС, относятся ко второму типу. При реализации последовательного проветривания существует некоторый предел количества машин, находящихся в одновременной работе, при котором концентрации становятся выше предельно-допустимых значений.

Существует два решения данной задачи. Первое заключается в ограничении одновременно работающих машин с ДВС в камерах служебного назначения. Второе относится к организационным и позволяет не ограничиваться количеством машин. К таковым стоит отнести реализацию системы управления проветривания КСН, алгоритм которой представлен на рис. 8. Последовательное проветривание камер служебного назначения на различных калийных рудниках помогает снижать количество воздуха, подаваемого в шахту на 15...30%, не пренебрегая при этом безопасностью горнорабочих.

Стоит отметить, что система вентиляции с последовательным проветриванием камер служебного назначения успешно зарекомендовала себя на калийных рудниках Старобинского месторождения (Беларусь). Подобная схема проветривания реализована на калийных рудниках Беларуси уже на протяжении нескольких лет и работает в штатном, безаварийном режиме.

*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 1021100814775-3-2.7.5) и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 20-45-596021*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Szczurek A., Maciejewska M., Przybyla M., Szetelnicki W. Improving air quality for operators of mobile machines in underground mines // Atmosphere. – 2020. – V. 11, №. 12. – Номер статьи 1372.
2. 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.
3. Волотковская Н.С., Семенов А.С., Федоров О.В. Энергоэффективность и энергосбережение в системах электроснабжения горнодобывающих предприятий // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2019. – №. 3 (78). – С. 52-62.
4. 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. – DOI: [10.17580/gzh.2018.08.15](https://doi.org/10.17580/gzh.2018.08.15).
5. Егоров А.Н., Семенов А.С., Федоров О.В., Харитонов Я.С. Анализ энергоэффективности главной вентиляторной установки рудника по добыче алмазосодержащих пород // Вестник Казанского гос. энергетич. ун-та. – 2018. – Т. 10, №. 2 (38). – С. 60-72.
6. Колесов Е.В. Обоснование последовательного проветривания рабочих зон нескольких тупиковых выработок // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 16 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2018. – С. 291-295. – DOI: [10.7242/gdsp.2018.16.78](https://doi.org/10.7242/gdsp.2018.16.78).
7. Левин Л.Ю., Кормщиков Д.С., Семин М.А. Решение задачи оперативного расчета распределения продуктов горения в сети горных выработок // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 12. – С. 179-184.
8. Старков Л.И., Земсков А.Н., Кондрашев П.И. Развитие механизированной разработки калийных руд. – Пермь; Соликамск: Изд-во ПГТУ, 2007. – 522 с.
9. 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 «НТИЦ исследований проблем пром. безопасности, 2021. – 520 с. – (Документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр: сер. 03, вып. 78).