

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗОВОЙ КАЛОРИФЕРНОЙ ПРЯМОГО НАГРЕВА ДЛЯ УСЛОВИЙ КАЛИЙНОГО РУДНИКА

Д.В. Ольховский, О.Д. Залазаев
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: В работе приведены достоинства и недостатки применения газовых калориферов прямого нагрева воздуха. Выполнен анализ изменения газового состава воздуха, поступающего в горные выработки рудника, с учетом применения калориферов прямого нагрева. Представлено обоснование возможности применения технологии комбинированного нагрева воздуха для условий калийного рудника ВКМКС. Проведена оценка влияния изменения газового состава воздуха, используемого для проветривания рабочих зон, на факторы расчета количества воздуха.

Ключевые слова: воздухоподготовка, калорифер прямого нагрева, ядовитые газы, предельно допустимая концентрация, комбинированный нагрев, расчет количества воздуха.

Введение

Предприятия горнодобывающего комплекса относятся к числу наиболее энергоёмких в промышленности в Российской Федерации [1]. При этом значительная часть (до 40%) затрат энергии приходится на подогрев атмосферного воздуха, подаваемого в подземные выработки рудников. Объем воздуха, используемого для проветривания рудников, с каждым годом увеличивается. В связи с этим снижение затрат на воздухоподготовку в современных экономических условиях является наиболее актуальным.

Для уменьшения эксплуатационных и капитальных затрат на нагрев воздуха целесообразно использовать газовые калориферные установки, которые характеризуются высоким коэффициентом полезного действия по сравнению с калориферами другого типа. Газовые калориферы отличаются способами нагревания воздуха и подразделяются на три типа: прямого нагрева, рекуперативные и термосифонные [2]. В случае применения газовых калориферов прямого нагрева возможно превышение предельно допустимых концентраций ядовитых газов в воздухе, который поступает в горные выработки рудника. Исходя из этого, при выборе газовых калориферов прямого нагрева существует необходимость в исследовании газового состава подготавливаемого воздуха и его влияния на факторы проветривания рабочих зон. Цель работы заключается в обосновании возможности безопасного применения прямого нагрева воздуха, подаваемого в подземные выработки калийного рудника.

Применение газовых калориферов прямого нагрева

Рассмотрим подробнее способы нагревания воздуха газовыми калориферами. В первом случае атмосферный воздух нагревается за счет его смешивания с продуктами сгорания при открытом сжигании газа в воздушном потоке (калориферы прямого нагрева). Во второй функции всей системы генерации и транспортировки тепла (котельной, теплотрассы и калорифера) совмещены в едином блоке, а тепло передается с помощью термосифонных элементов (термосифонные калориферы). В третьем нагрев воздуха осуществляется в газоздушных теплообменниках через стальную теплообменную поверхность (рекуперативные калориферы), теплоносителем при этом являются продукты сгорания газа, которые выбрасываются за пределы воздухозабора рудника.

Достоинствами вышеперечисленных систем являются:

- исключение затрат на строительство котельной, теплотрасс, калориферов;
- низкие эксплуатационные затраты;
- быстрый выход на заданный тепловой режим;
- высокий КПД использования газа;
- минимальные потери тепла с уходящими продуктами сгорания;
- плавное, экономичное управление процессом воздухоподготовки в зависимости от времени суток и температуры окружающего воздуха;
- широкий диапазон регулирования каждого агрегата по тепловой производительности;
- возможность диспетчеризации;
- компактность и простота монтажа.

На данный момент на многих предприятиях широко используются и зарекомендовали себя калориферы рекуперативного типа и термосифонные [3, 4]. При этом калориферы прямого нагрева, в отличие от аналогов, практически не применяются в связи с присущими им недостатками. Принцип работы газовых калориферов прямого нагрева предусматривает нагрев воздуха за счет смешения его с продуктами горения [5]. В результате при сжигании углеводородного топлива (например, природный газ, мазут, дизельное топливо) выделяются различные ядовитые газы, такие как углекислый газ (CO_2), угарный газ (CO), окислы азота (NO и NO_2) и диоксид серы (SO_2), которые могут, во-первых, заместить собой необходимый для дыхания кислород и, во-вторых, привести к загрязнению воздуха, подаваемого для проветривания горных выработок, а также рабочих зон [6]. Необходимо отметить, что применение существующих средств контроля горения позволяют избежать превышения предельно допустимых концентраций (ПДК) продуктов сгорания в подаваемом в рудник воздухе.

Таким образом, для успешной реализации проектов, предусматривающих использование газовых калориферов прямого нагрева, необходимо проводить дополнительные исследования аэрогазодинамических процессов в части изучения газового состава после прямого нагрева в системах воздухоподготовки такого типа. Результаты исследования должны включать обоснование технологии применения газовых калориферов, направленное на обеспечение безопасных условий труда в руднике.

Газовый состав подогреваемого воздуха при прямом нагреве воздуха

В целях исследования возможности применения газовых калориферных установок прямого нагрева для условий одного из калийных рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей (ВКМКС) первоначально выполнено изучение газового состава воздуха, проходящего через калориферы прямого нагрева.

Для определения концентраций ядовитых веществ в воздухе необходимо знать объём их выделения и объём воздуха, в котором они будут растворены. Объём выделения всех компонентов прежде всего зависит от массы сжигаемого топлива, то есть от мощности установки, а также от химического состава топлива, температуры горения, коэффициента избытка воздуха.

Основные параметры, необходимые для расчета объема выделения ядовитых газов при работе калориферов прямого нагрева, взяты из проектной документации для исследуемого участка ВКМКС и приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для определения объема выбросов загрязняющих веществ газовой калориферной прямого нагрева

Параметр	Значение
Номинальная мощность секции газового калорифера прямого нагрева	3,2 МВт
Номинальный расход газа секции газового калорифера прямого нагрева	0,0944 м ³ /с
Расход воздуха через секцию газового калорифера	58,3 м ³ /с
Низшая теплота сгорания природного газа	33,94 МДж/кг
Количество (секций) калориферов прямого нагрева	4 шт.
Суммарный расход воздуха через калориферную	520 м ³ /с
Химический состав природного газа подаваемого на калориферную	
Метан	98,68 %
Этан	0,31 %
Пропан	0,1 %
Изобутан	0,02 %
Пропан-бутан	0,03 %
Азот	0,8 %
Двуокись углерода	0,06 %
Сероводород	0,001 г/м ³
Меркаптановая сера	0,0082 г/м ³
Фоновые концентрации ядовитых газов в атмосферном воздухе	
Диоксид серы, SO ₂	0,034 мг/м ³
Оксид углерода, CO	1,3 мг/м ³
Диоксид углерода, CO ₂	0,1 % / 1826 мг/м ³
Диоксид азота, NO ₂	0,045 мг/м ³
Оксид азота, NO	0,018 мг/м ³

Для определения типа применяемых калориферов и их количества необходимо определить концентрации ядовитых газов после калориферов прямого нагрева. Для этого был выполнен расчет по методике [7].

Расчет выбросов окиси углерода

Количество окиси углерода M_{CO} , г/с выделяющегося при сжигании газа в калорифере прямого нагрева, вычисляется по формуле:

$$M_{CO} = 0,001 \cdot B \cdot Q_H^P \cdot K_{CO} \cdot \left(1 - \frac{q_4}{100}\right), \text{ г/с} \quad (1)$$

где B – расход топлива, 94,4 л/с; Q_H^P – низшая теплотворная способность топлива, 33,94 МДж/м³; K_{CO} – количество окислов углерода образующихся на 1 ГДж, 0,25 кг/ГДж; q_4 – коэффициент, учитывающий неполноту сгорания, для газа равен – 0,5%.

Расчет выбросов окислов азота

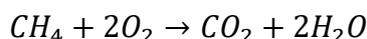
Количество окислов азота M_{NO_2} , г/с в пересчете на NO_2 выделяющихся при сжигании газа в калорифере прямого нагрева вычисляется по формуле:

$$M_{NO_2} = 0,001 \cdot B \cdot Q_H^P \cdot K_{NO_2} \cdot (1 - \beta), \text{ г/с} \quad (2)$$

где B – расход топлива, 94,4 л/с; Q_H^P – низшая теплотворная способность топлива, 33,94 МДж/м³; K_{NO_2} – количество окислов азота образующихся на 1 ГДж, для газового калорифера мощностью 3200 кВт равно 0,093 кг/ГДж; β – коэффициент учитывающий степень снижения выбросов окислов азота в результате применения технических решений.

Расчет выбросов диоксида углерода

Основным горючим компонентом природного газа является метан CH_4 (98,68%). Объем прочих горючих газов является незначительным, поэтому для определения объемной концентрации диоксида углерода в воздухе после калорифера прямого нагрева можно определить, исходя из формулы окисления метана:



Массовая концентрация диоксида углерода, г/с выделяющихся при сжигании природного газа в калориферной прямого нагрева вычисляется по формуле:

$$M_{CO_2} = B \cdot K_1 \cdot TH_3 \cdot K_2 \cdot \frac{44}{12} \text{ г/с} \quad (3)$$

где B – расход топлива, 0,0944 м³/с; K_1 – коэффициент окисления углерода в топливе, для природного газа равен 0,995; TH_3 – теплотворное нетто-значение, для природного газа равен 34,78 Дж/тонн; K_2 – коэффициент выбросов углерода, для природного газа равен 15,04 тонн/Дж; 44/12 – коэффициент пересчета углерода в углекислый газ (молекулярные веса соответственно: углерод – 12 г/моль, $O_2 = 2 \times 16 = 32$ г/моль, $CO_2 = 44$ г/моль).

Расчет выбросов диоксида серы

Согласно паспорту качества газа, основными источниками диоксида серы являются сероводород и меркаптановая сера. Для определения количества выделяющегося диоксида серы при сжигании сероводорода применяется формула:

$$M_{SO_2} = B \cdot C_{H_2S} \cdot \frac{64}{34}, \text{ мг/с} \quad (4)$$

где B – расход топлива, 0,0944 м³/с; C_i – массовая концентрация сероводорода в топливе 0,001 г/м³; 64/34 – коэффициент пересчета сероводорода в диоксид серы (молекулярные веса соответственно: сероводород – 34 г/моль, $SO_2 = 64$ г/моль).

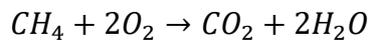
Для определения количества выделяющегося диоксида серы при сжигании меркаптановой серы применяется формула:

$$M_{SO_2} = B \cdot C_{CH_4S} \cdot \frac{64}{48}, \text{ г/с} \quad (5)$$

где C_i – массовая концентрация меркаптановой серы $0,0082 \text{ г/м}^3$; $64/48$ – коэффициент пересчета меркаптановой серы в диоксид серы (молекулярные веса соответственно: меркаптановая сера – 48 г/моль , $SO_2 = 64 \text{ г/моль}$).

Расчет потребления кислорода

Основным горючим компонентом природного газа является метан CH_4 (98,68%). Объем прочих горючих газов является незначительным, поэтому для определения снижения уровня кислорода в воздухе после калорифера прямого нагрева в результате смешения с продуктами сгорания можно определить исходя из формулы окисления метана:



В результаты проведенных расчетов полученные концентрации ядовитых газов в воздухе, подаваемом в рудник, представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, подаваемом в рудник

Компонент	Концентрация компонента	ПДК
Оксид углерода (CO)	14,97 мг/м ³	20 мг/м ³
Оксиды азота (NO _x)	5,16 мг/м ³	5 мг/м ³
Диоксид углерода (CO ₂)	4890 мг/м ³	9000 мг/м ³
Диоксид серы (SO ₂)	0,055 мг/м ³	10 мг/м ³
Кислород (O ₂)	20,54 %	20,0 %

Согласно полученным результатам расчета, при использовании для воздухоподготовки только калориферов прямого нагрева возможно превышение ПДК по окислам азота (NO_x). Необходимо отметить, что используемая методика расчета не учитывает некоторые факторы, например температуру горения, которая напрямую влияет на объем выделения окислов азота. В связи с этим для определения фактических концентраций газов рекомендовано проводить опытные испытания планируемых к применению газовых калориферов.

Таким образом, с учетом представленных выше результатов расчета концентраций ядовитых газов и отсутствия фактических измерений выбросов после прямого нагрева воздуха дальнейшая проработка проекта осуществлялась только с учетом применения технологии комбинированного нагрева воздуха. Под технологией комбинированного нагрева воздуха понимается совместное применение калориферов прямого нагрева и рекуперативных газовых калориферов.

Обоснование возможности применения технологии комбинированного нагрева воздуха для калийного рудника ВКМКС

Согласно результатам расчета концентраций ядовитых газов в воздухе после калориферов прямого нагрева, применение только технологии прямого нагрева воздуха для

рассмотренных условий без проведения промышленных испытаний калориферов является недопустимым. При этом применение комбинированной калориферной установки, в которой будут использованы как калориферы прямого нагрева, так и рекуперативные теплообменники позволит исключить риск подачи в выработки воздуха, содержание газов в котором будет превышать ПДК.

Для определения количества газовых рекуперативных калориферов и калориферов прямого нагрева необходимо знать предельно допустимые концентрации по каждому компоненту ядовитых газов, концентрации ядовитых газов в воздухе после калорифера прямого нагрева, расходы воздуха на калориферах и требуемый расход воздуха для проветривания рабочих зон рудника. Исходные параметры приведены в таблице 3.

Таблица 3

Параметры воздуха до и после калориферов,
необходимые для определения количества калориферов

Компонент	Атмосферный воздух*	Калорифер		ПДК
		Рекуперативный	Прямого нагрева	
Оксид углерода (CO)	1,3 мг/м ³	1,3 мг/м ³	14,97 мг/м ³	20 мг/м ³
Окислы азота (NO _x)	0,045 мг/м ³	0,045 мг/м ³	5,16 мг/м ³	5 мг/м ³
Диоксид углерода (CO ₂)	0,1 %	0,1 %	0,262 %	0,5 %
Диоксид серы (SO ₂)	0,034 мг/м ³	0,034 мг/м ³	0,055 мг/м ³	10 мг/м ³
Кислород (O ₂)	20,9 %	20,9 %	20,54 %	20,0 %
Расход воздуха	520 м ³ /с (для рудника)	18,3 м ³ /с	58,3 м ³ /с	-

* – химический состав атмосферного воздуха взят на основе данных ФГБУ «Пермский ЦГМС»;

Для определения максимального объема воздуха, который возможно нагревать в газовых калориферах прямого нагрева, можно воспользоваться формулой, полученной из условия разбавления газа после калориферной установки прямого нагрева атмосферным воздухом с содержащейся фоновой концентрацией газов до состояния газоздушная смеси в пределах ПДК:

$$Q_{\text{пр}} = \frac{Q_{\text{руд}} \cdot (C_{\text{пдк}}^{\text{NO}} - C_{\text{фон}}^{\text{NO}})}{(C_{\text{пр}}^{\text{NO}} - C_{\text{фон}}^{\text{NO}})}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (6)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – максимально возможный расход воздуха, который можно обеспечить с помощью калориферов прямого нагрева, м³/с; $C_{\text{фон}}^{\text{NO}}$ – фоновая концентрация окислов азота в атмосфере, 0,045 мг/м³; $C_{\text{пр}}^{\text{NO}}$ – концентрация окислов азота в воздухе после нагрева в калорифере прямого нагрева, 5,16 мг/м³; $Q_{\text{руд}}$ – требуемый расход воздуха в руднике, 520 м³/с; $C_{\text{пдк}}^{\text{NO}}$ – предельно допустимая концентрация окислов азота в рудничном воздухе, 5 мг/м³.

Подставляя значения в уравнение (6) получаем, что максимально допустимый объем воздуха, который можно нагреть с помощью калориферов прямого нагрева, составляет

503 м³/с. Таким образом, учитывая что максимальное количество воздуха, которое возможно нагреть в одной секции калорифера прямого нагрева, составляет 58,3 м³/с, максимальное количество калориферов прямого нагрева составит 8 шт. и они будут способны нагреть 466,4 м³/с, остальной объем воздуха необходимо нагревать с помощью рекуперативных газовых калориферов (3 шт.). При этом требуемая тепловая мощность для нагрева 520 м³/с составляет 28,8 МВт.

Таким образом, принимая во внимание результаты расчета максимально возможного количества калориферов прямого нагрева, используемых для воздухоподготовки, а также результаты проектных решений, ниже для определения концентраций ядовитых веществ в воздухе, поступающем в рудник после нагрева в комбинированной газовой калориферной, рассматривается два варианта:

- вариант 1 – предлагаемый (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных);
- вариант 2 – проектный (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных).

Расчет концентраций ядовитых газов, поступающих на проветривание в рудник, при комбинированной системе нагрева воздуха определяется по формуле:

$$C_{\text{руд}} = \frac{Q_{\text{пр}} \cdot C_{\text{пр}} + Q_{\text{р}} \cdot C_{\text{р}}}{Q_{\text{руд}}}, \text{ м}^3/\text{с} \quad (7)$$

где $Q_{\text{пр}}$ – расход воздуха на всех калориферах прямого нагрева, м³/с; $Q_{\text{р}}$ – расход воздуха на всех рекуперативных калориферах, м³/с; $C_{\text{р}}$ – фоновая концентрация ядовитых газов в атмосфере, мг/м³.

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника, сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника

Компонент	Концентрация в воздухе, поступающего в рудник	ПДК
Вариант 1 (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	13,56 мг/м ³	20 мг/м ³
Окислы азота (NO _x)	4,63 мг/м ³	5 мг/м ³
Диоксид углерода (CO ₂)	0,245 %	0,5 %
Диоксид серы (SO ₂)	0,052 мг/м ³	10 мг/м ³
Кислород (O ₂)	20,57 %	20,0 %
Вариант 2 (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	7,4 мг/м ³	20 мг/м ³
Окислы азота (NO _x)	2,31 мг/м ³	5 мг/м ³
Диоксид углерода (CO ₂)	0,172 %	0,5 %
Диоксид серы (SO ₂)	0,043 мг/м ³	10 мг/м ³
Кислород (O ₂)	20,74 %	20,0 %

Согласно результатам расчета, реализация как варианта 1, так и варианта 2 позволяет обеспечить подачу в рудник воздуха с содержанием ядовитых газов меньше значений ПДК. Однако следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют достовер-

ные данные о количестве доокисляемого монооксида азота в условиях рудника, поэтому при движении воздуха по подземным выработкам существует риск перехода монооксида азота (NO) в диоксид азота (NO_2) [8]. В результате при определенных условиях может наблюдаться превышение ПДК по диоксиду азота (2 мг/м^3) [9]. На основе многолетних наблюдений можно ожидать, что при прохождении воздуха по выработкам около 10-30% монооксида азота перейдет в диоксид азота, следовательно для исключения риска превышения ПДК по диоксиду азота рекомендуется использовать только вариант 2 – проектные решения.

В результате при минимальной расчетной температуре наружного воздуха -37°C и расходе воздуха $520 \text{ м}^3/\text{с}$ суммарная тепловая мощность калориферов для первого варианта составит 28,9 МВт, а для второго варианта – 30,4 МВт. Однако, как было отмечено, при использовании первого варианта имеется риск превышения ПДК по оксидам азота, в связи с этим выбран второй вариант, где схема менее экономична, но более безопасна.

Технологическая схема работы калориферных установок при комбинированной технологии воздухоподготовки представлена на рисунке 1.

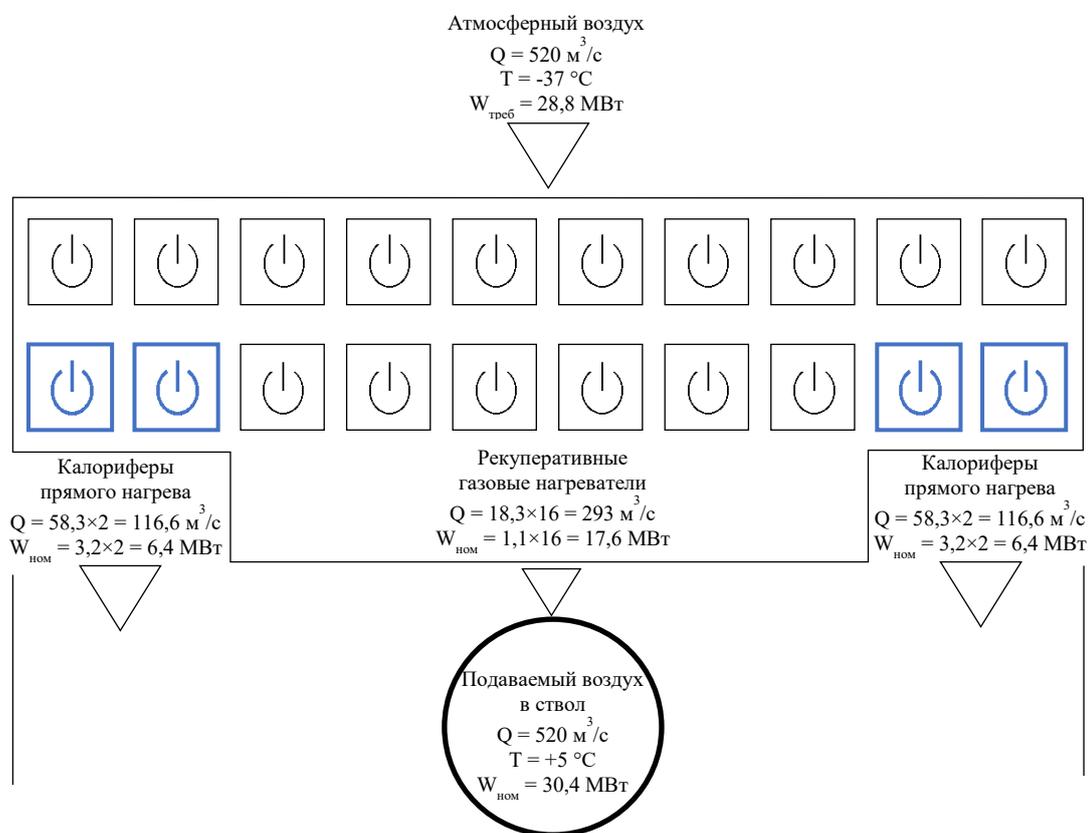


Рис. 1. Технологическая схема работы калориферов при комбинированной системе нагрева воздуха и нормальном режиме проветривания, и температуре атмосферного воздуха -37°C

Рекомендации по расчету требуемого количества воздуха для рудника

Учитывая изменение газового состава воздуха, поступающего на проветривание подземных выработок, требовалось выполнить анализ его влияния на факторы проветривания рабочих зон рудника. Расчет количества воздуха (РКВ) выполнялся по методике, разработанной на калийном руднике ВКМКС. РКВ, где необходимо учитывать концентрации ядовитых газов, выделяющихся при работе газовых калориферов прямого нагрева, ведется для следующих случаев:

- 1) при определении расхода воздуха по фактору «газы от взрывных работ»;
- 2) при определении расхода воздуха по фактору «газы от машин с ДВС».

Для определения расхода воздуха по фактору «газы от взрывных работ» применяется:

$$Q_3 = \left[k_1 \cdot \left(\lg \frac{C}{C_0} \right) + k_2 \right] \cdot \frac{V}{t}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (8)$$

где k_1 – коэффициент, учитывающий характер выноса примеси; \lg – десятичный логарифм выражения; k_2 – коэффициент, учитывающий тип выработки; C_0 – допустимая концентрация соответствующих газов, %; C – ожидаемая начальная концентрация соответствующих газов, %; t – расчетное время проветривания, мин; V – проветриваемый объем, м^3 .

Данная формула не учитывает фоновые концентрации соответствующих компонентов. Для их учета необходимо скорректировать формулу следующим образом:

$$Q_3 = \left[k_1 \cdot \left(\lg \frac{C + C_{\text{фон}}}{C_0 + C_{\text{фон}}} \right) + k_2 \right] \cdot \frac{V}{t}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (9)$$

где $C_{\text{фон}}$ – фоновая концентрация соответствующих газов (после калориферов), %.

Для определения расхода воздуха по фактору «газы от машин с ДВС» применяется:

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{доп}}} \cdot g_{\text{вых}}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (10)$$

где $C_{\text{вых}}$ – концентрация ядовитых компонентов выхлопных газов (оксид углерода, диоксида азота в пересчете на NO_2), % по объему; $C_{\text{доп}}$ – ПДК по соответствующему компоненту, % по объему; $g_{\text{вых}}$ – количество выхлопных газов после очистки, $\text{м}^3/\text{мин}$.

В данной формуле (10) также не учитываются фоновые концентрации ядовитых компонентов в воздухе, поэтому для их учета необходимо скорректировать формулу:

$$Q_{\text{ДВС}} = \frac{C_{\text{вых}}}{C_{\text{доп}} + C_{\text{фон}}} \cdot g_{\text{вых}}, \text{ м}^3/\text{мин} \quad (11)$$

где $C_{\text{фон}}$ – фоновая концентрация соответствующих газов (после калориферов), %.

Кроме корректировки выше представленных формул в качестве исходных данных для РКВ в методику необходимо добавить таблицу с рассчитанными фоновыми концентрациями ядовитых газов, поступающих в рудник. После запуска калориферной установки следует провести экспериментальные замеры и скорректировать фоновые концентрации с учетом проведенных испытаний.

Выводы

Проведенные расчеты концентрации ядовитых газов после калориферов прямого нагрева показали, что при использовании для воздухоподготовки только калориферов прямого нагрева для рассматриваемых условий ВКМКС возможно превышение ПДК по окислам азота (NO_x). Исходя из этого предложена комбинированная схема нагрева воздуха, которая предусматривает применение как газовых калориферов прямого нагрева, так и рекуперативных, с целью снижения концентрации ядовитых газов в воздухе, поступающем в горные выработки рудника.

Для определения концентраций ядовитых веществ в воздухе, поступающем в рудник после нагрева в комбинированной газовой калориферной, было рассмотрено два варианта:

- вариант 1 – предлагаемый (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных);
- вариант 2 – проектный (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных).

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника, сведены в таблицу 5.

Таблица 5

Результаты расчета концентраций ядовитых газов в воздухе, поступающем на проветривание в подземные выработки рудника

Компонент	Концентрация в воздухе, поступающем в рудник	ПДК
Вариант 1 (8 калориферов прямого нагрева и 3 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	13,56 мг/м ³	20 мг/м ³
Окислы азота (NO _x)	4,63 мг/м ³	5 мг/м ³
Диоксид углерода (CO ₂)	0,245 %	0,5 %
Диоксид серы (SO ₂)	0,052 мг/м ³	10 мг/м ³
Кислород (O ₂)	20,57 %	20,0 %
Вариант 2 (4 калорифера прямого нагрева и 16 рекуперативных)		
Оксид углерода (CO)	7,4 мг/м ³	20 мг/м ³
Окислы азота (NO _x)	2,31 мг/м ³	5 мг/м ³
Диоксид углерода (CO ₂)	0,172 %	0,5 %
Диоксид серы (SO ₂)	0,043 мг/м ³	10 мг/м ³
Кислород (O ₂)	20,74 %	20,0 %

Согласно результатам расчета, как реализация варианта 1, так и реализация варианта 2 позволяет обеспечить подачу в рудник воздуха с содержанием ядовитых газов меньше значений ПДК. Однако следует отметить, что на сегодняшний день отсутствуют достоверные данные о количестве доокисляемого монооксида азота в условиях рудника, поэтому при движении воздуха по подземным выработкам существует риск перехода монооксида азота (NO) в диоксид азота (NO₂). В результате при определенных условиях может наблюдаться превышение ПДК по диоксиду азота (2 мг/м³). На основе многолетних наблюдений можно ожидать, что при прохождении воздуха по выработкам около 10-30% монооксида азота перейдет в диоксид азота, следовательно для исключения риска превышения ПДК по диоксиду азота рекомендуется использовать только вариант 2 – проектные решения.

На основании проведенного анализа методики расчета требуемого количества воздуха (РКВ) для учета влияния газовой калориферной на состав рудничного воздуха предложены модификации в расчетные формулы по определению расхода воздуха по фактору «газы от взрывных работ» и по фактору «газы от машин с ДВС». Внесенные изменения позволяют учесть фоновые концентрации ядовитых газов, образующихся в результате работы газовой калориферной прямого нагрева.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и образования РФ (рег. номер НИОКТР 122012000396-6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю. Теоретические и технологические основы ресурсосберегающих систем воздухоподготовки рудников: дис. ... д.т.н.: 25.00.20: защищена 29.04.10 / Левин Лев Юрьевич. – Пермь, 2010. – 275 с.
2. Левин Л.Ю., Казаков Б.П. Использование газовых теплогенераторов в системах обогрева воздухоподающих стволов калийных рудников // Горн. информ.-аналит. бюл. – 2008. – № 10. – С. 55-59.
3. Левин Л.Ю., Ключкин Ю.А. Исследование и пути решения характерных проблем работы вентиляторных систем воздухоподготовки на примере главной системы воздухоподготовки рудника «Мир». // Вестник ПНИПУ: Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 3. – С. 138-142.
4. Рязанов В.И., Щелоков А.В. Сравнительная характеристика газовых воздухонагревателей смешительного типа // Молодежь и XXI век – 2018: Материалы VIII Междунар. молодежной науч. конф. – 2018. – Т. 5. – С. 231-234.
5. Бородавкин Д.А., Зайцев А.В. Анализ эффективности применения газовых калориферов прямого нагрева в условиях шахт и рудников // Горное эхо. – 2020. – № 2 (79). – С. 95-99. – DOI: 10.7242/echo.2020.2.19.
6. Величковский В.Т., Маликов Ю. К., Троицкая Н.А., Беленькая М.А., Сергеева Н.В., Широкова О.В., Кашанский С.В., Слышкина Т.В., Симонова О.В., Зыкова В.А. Гигиеническая оценка использования прямого подогрева воздуха, подаваемого в шахту // Гигиена и санитария – 2011. – № 4. – С. 41-45.
7. Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ при сжигании топлива в котлах производительностью до 30 т/ч: утв. Госкомитетом СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 5.08.1985 г. – М., 1985. – 24 с.
8. Методика определения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при сжигании топлива в котлах производительностью менее 30 тонн пара в час или менее 20 Гкал в час: утв. Госкомитетом РФ по охране окружающей среды 9.07.1999 г. – М., 1999. – 76 с.
9. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утв. гл. сан. врачом РФ 28.01.2021; зарегистрированы в Минюсте РФ 29.01.2021, № 62296. – С. 1025.

УДК 622.253

DOI:10.7242/echo.2023.4.18

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО РЕЖИМА ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОПОРОДНОГО ОГРАЖДЕНИЯ ИЛИ ЕГО РАЗМОРАЖИВАНИЯ НА ОСНОВЕ МНОГОВАРИАНТНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. Пугин, А.В. Богомялков, К.М. Агеева
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Разработка основных технических решений для проекта на искусственное замораживание и размораживание горных пород при строительстве шахтных стволов предусматривает расчеты для определения рационального режима работы замораживающего комплекса. Данная задача неразрывно связана с определением требуемой холодопроизводительности замораживающей станции и напрямую влияет на выбор холодильного (нагревательного) оборудования. В статье описывается подход к решению указанных задач, основанный на многовариантном численном математическом моделировании процессов теплопереноса в искусственно замораживаемом или размораживаемом массиве горных пород. Теплофизическое моделирование производится в программном комплексе «FrozenWall». Предлагаемый подход позволяет в разумные сроки определить параметры режима работы холодильного оборудования или нагревательного оборудования, наилучшего с точки зрения достижения целей всего комплекса строительных работ с минимизацией затрат.

Ключевые слова: искусственное замораживание, размораживание, ледопородное ограждение, проектирование, многовариантное моделирование, рациональный режим.

Разработка технических решений для проекта на замораживание и последующее размораживание горных пород все больше требует применения современных методов теплофизического моделирования и численных математических расчетов. Одной из