

# РУДНИЧНАЯ АЭРОГАЗОДИНАМИКА И ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.43

DOI:10.7242/echo.2019.4.21

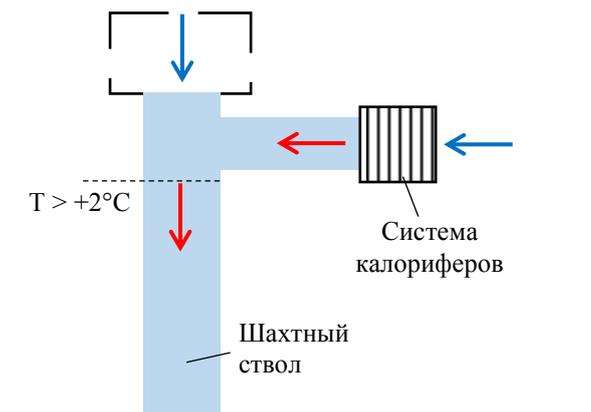
## МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА В СИСТЕМАХ ВОЗДУХОПОДГОТОВКИ ШАХТ И РУДНИКОВ

Д.А. БОРОДАВКИН, А.В. ЗАЙЦЕВ  
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

**Аннотация.** В данной работе проводится анализ используемого в Горном институте подхода к моделированию теплообменных процессов в водяных калориферных установках шахт и рудников, анализируются различные принятые модельные допущения. Приводится описание программного модуля, предназначенного для термодинамического и гидравлического расчета произвольных компоновок калориферов, основанного на численном моделировании теплообмена между воздухом и водой через металлическую стенку трубок калориферов. Предлагаются направления для совершенствования расчетов систем нагрева воздуха.

**Ключевые слова:** система воздухоподготовки, калорифер, математическая модель, энергоэффективность, конвективная стратификация.

Согласно п.155 «Правил безопасности при ведении горных работ ...» [1], воздух, поступающий в подземные горные выработки, должен иметь температуру не менее  $+2^{\circ}\text{C}$ . Ввиду данного требования, для подогрева воздуха в холодный период года шахты и рудники оборудуются системами воздухоподготовки: часть объема холодного воздуха, подаваемого в воздухоподающий ствол рудника, пропускается через систему теплообменных модулей, расположенных на поверхности рядом с надшахтным зданием ствола и соединённых между собой определённым образом (см. рис.1). В результате теплообмена холодного воздуха с горячим теплоносителем (как правило, вода или газ), происходит нагрев воздуха до требуемой температуры.



**Рис. 1.** Схема движения воздушных потоков в калориферной системе шахтного воздухоподающего ствола

Традиционным методом выбора компоновки систем воздухоподготовки в условиях конкретных шахт и рудников является метод ручного перебора. Исходя из известных технических характеристик отдельных теплообменников выполняется итерационный расчет системы теплообменников. Такая система должна обеспечить требуемый нагрев, а также высокую энергоэффективность [1, 2]. Многообразие моделей теплообменников

(калориферов) и вариантов компоновочных решений приводит к тому, что процесс подбора занимает много времени. Ввиду того что ручной перебор занимает много времени, а расчетами занимается человек (появляется фактор субъективности) повышается риск того, что часть вариантов при расчетах не рассматривается.

Для сокращения сроков, трудоемкости и повышения эффективности выполняемых работ по выбору теплообменников, специалистами Горного института УрО РАН разработан программно-вычислительный комплекс «TR\_Kalor» [3]. Данный программно-вычислительный комплекс позволяет рассчитывать и подбирать основное технологическое оборудование с учетом индивидуальных особенностей воздухоподающих стволов. Программно-вычислительный комплекс состоит из нескольких модулей: первый модуль выполняет теплофизический расчет калориферных установок, второй модуль предназначен для расчета аэродинамических параметров основных узлов системы воздухоподготовки, третий модуль рассчитывает места слияния струй с различными термодинамическими параметрами.

В основе существующих методов расчёта теплообмена воздуха и калорифера лежит усреднение температур воздуха и воды, т.е. при расчёте теплообмена предполагается, что температура воздуха равна арифметическому среднему между начальной и конечной температурой, и аналогично для воды. Такой подход имеет неточности, поскольку предполагает линейную зависимость температуры от координаты, что не подтверждается на практике. Наиболее отчетливо это наблюдается в системах, где калориферы подключены последовательно по воде или по воздуху [4].

При составлении более точной, не усреднённой математической модели рассматривалась система, состоящая из одного калорифера. За основу бралась следующая формула теплообмена:

$$j = k \cdot (T_w(x) - T_v(x, z)), \quad (1)$$

где  $z$  – координата по ходу движения воздуха (м);  $x$  – координата по ходу движения воды (м);  $j$  – плотность потока теплоты от воды к воздуху ( $\text{Вт}/\text{м}^2$ );  $T_w$  – температура воды ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_v$  – температура воздуха;  $k$  – коэффициент теплообмена, зависящий от скоростей движения воды и воздуха ( $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ).

Расчёт для системы калориферов производится аналогичным образом по следующей схеме. Для простоты предполагается, что калориферы в системе одинаковые и что ряды калориферов (последовательные по воздуху) подключены параллельно по воде, а ряды содержат равное количество последовательных по воде цепочек калориферов, содержащих равное количество калориферов. Система распадается на  $N_o$  подсистем, содержащих  $N_r \times N_{ko}$  калориферов, здесь  $N_o$  – количество последовательных по воде цепочек калориферов в каждом ряду,  $N_{ko}$  – количество калориферов в каждой цепочке и  $N_r$  – количество рядов. Расчёт сводится к рассмотрению только одной подсистемы, т.к. для остальных будет то же самое. При этом предполагается, что калориферы, находящиеся друг над другом, подключены последовательно по воде, составляя один эквивалентный калорифер по вертикали – это важно для расчёта вертикальной стратификации скорости [5]. Количество горизонтальных подсистем калориферов значения не имеет, но все они должны быть подключены к воде независимо (т.е. параллельно), чтобы не оказывать влияния друг на друга [6].

Исследование математической модели, которая легла в основу программно-вычислительного комплекса «TR\_Kalor» показало, что при его разработке принят ряд допущений.

**Допущение № 1.** При расположении теплообменников вплотную температура воздуха усредняется по рядам.

Экспериментальные исследования показали, что при нагреве воздуха в зимний период, основная часть воздуха движется по нижним секциям, в результате чего наблюдается неравномерный нагрев воздуха по сечению. При расположении нескольких сту-

пней нагрева в плотную температура воздуха по сечению не успевает выровняться. Поэтому допущение № 1 уместно в случае моделирования течения воздуха через несколько последовательно установленных калориферов разнесенных на достаточное для перемешивания воздушных потоков расстояние [7].

**Допущение № 2.** Плотность воздуха задана и неизменна.

Как правило, депрессия проектируемых систем воздухоподготовки в худшем случае имеет порядок 100 Па, что приводит к изменению плотности воздушного потока на 0,1% при прохождении им через систему теплообменных модулей. В зимний период года в северных регионах России разница температур воздуха до и после нагрева может достигать 60-80 °С, это приводит к относительному изменению плотности на 25-35%. В этом случае пренебрежение переменностью плотности воздуха может приводить к завышенным тепловым характеристикам системы [8].

**Допущение № 3.** Не учитывается конвективное расслоение воздушных потоков.

В зимний период года в условиях максимальной нагрузки на секции калориферов воздушный поток существенно нагревается. В результате этого происходит сильная дифференциация потока по плотностям что в свою очередь вызывает возникновение естественной конвекции внутри теплообменного аппарата и изменение поперечного профиля скоростей воздушного потока.

**Допущение № 4.** Не учитываются фазовые переходы теплоносителя.

Одна из функций водяных систем воздухоподготовки – охлаждение воздуха в летний период года. При этом в результате теплообмена между средами может выпадать конденсат. Возникающий при этом тепловой эффект не рассматривается, поэтому использование существующего программно-вычислительного комплекса для летнего периода не представляется возможным.

**Допущение № 5.** Расчет выполняется только для прямолинейно расположенных калориферов.

Традиционные методы расчета предполагают равномерное протекание воздуха через установленные калориферы, при этом воздух в такие системы заходит строго перпендикулярно, что обеспечивает равномерную нагрузку на все калориферы. Исследование технологических схем нагрева воздуха показало, что в ряде случаев для экономии места применяются схемы, при которых секции калориферов располагаются под углом друг к другу. В этом случае расчет системы представляется неполным [9].

В рамках перспективных исследований планируется повысить точность выполняемых расчетов за счет рассмотрения 3D моделирования процесса нагрева. 3D моделирование позволит перейти к численному методу расчета системы, что позволит отказаться от допущений, связанных с усреднением температуры теплоносителя по рядам, постоянством плотности воздуха, отсутствием учета конвективного расслоения, а также фазового перехода теплоносителя. Станет возможной оценка влияние использования непрямолинейных схем расположения теплообменников на эффективность нагрева в каждом из них.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке УрО РАН  
в рамках научного проекта № 18-5-5-5.*

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левин Л.Ю. Моделирование и расчет систем обогрева шахтных воздухоподающих стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2008. – № 10. – С. 49-54.
2. Минин В.Е. Воздухонагреватели для систем вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Стройиздат, 1976. – 199 с.: ил.
3. Левин Л.Ю. Проектирование вспомогательных систем обогрева вентиляционных стволов // Научные исследования и инновации. – 2009. – Т. 3, № 4. – С. 42-44.

4. Казаков Б.П. Ресурсосберегающие технологии управления климатическими параметрами рудников: на примере калийных рудников: дис. ... д.т.н.: 25.00.20 – Пермь, 2001. – 315 с.: ил.
5. Казаков Б.П., Шалимов А.В., Семин М.А., Гришин Е.Л., Трушкова Н.А. Конвективная стратификация воздушных потоков по сечению горных выработок, ее роль в формировании пожарных тепловых депрессий и влияние на устойчивость проветривания // Горный журнал. – 2014. – № 12. – С. 105-109.
6. 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.
7. Казаков Б.П., Шалимов А.В. Компонировка теплообменных модулей в системах кондиционирования рудничного воздуха // Горн. информ.-аналит. бюл.: «Геомеханические и геотехнологические проблемы освоения недр севера». – 2015. – S30. – С. 285-290.
8. Ключкин Ю.А. Исследование процесса теплообмена в существующих калориферных установках при увеличении количества воздуха, поступающего в ствол по калориферным каналам // Стратегия и процессы освоения георесурсов: сб. науч. тр. Вып. 11 / ГИ УрО РАН. – Пермь, 2013. – С. 278-280.
9. Газизуллин Р.Р., Левин Л.Ю., Ключкин Ю.А. Разработка систем воздухоподготовки для обогрева шахтных стволов в нормальном и реверсивном режимах проветривания рудников // Горн. информ.-аналит. бюл.: «Промышленная безопасность минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». – 2015. – № S7. – С. 19-25.

УДК 622.4

DOI:10.7242/echo.2019.4.22

## РАЗВИТИЕ СИСТЕМ АЭРОГАЗОВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РУДНИКОВ

Е.Л. ГРИШИН

*Горный институт УрО РАН, г. Пермь*

**Аннотация:** В работе представлены результаты промышленных испытаний системы аэрогазовой безопасности калийных рудников, проведенных в условиях рудника 4 рудоуправления ОАО «Беларуськалий». Система обеспечивает непрерывный мониторинг расхода воздуха и качественного состава рудничной атмосферы в рабочей зоне, оповещение диспетчера рудника о выходе контролируемых параметров за пределы допустимых значений, изменение расхода подаваемого на проветривание воздуха по результатам мониторинга, а также – аварийные режимы проветривания участка.

**Ключевые слова:** аэрогазовая безопасность, калийные рудники, рабочая зона, ядовитые газы, взрывоопасные газы, автоматическая вентиляционная дверь, аэроСеть.

Для угольной промышленности характерно уникальное развитие технологий, связанных с обеспечением промышленной безопасности. В частности правилами безопасности [1] регламентируется обязательность применения в угольных шахтах многофункциональных систем безопасности [2]. Самой ответственной частью многофункциональных систем безопасности, наиболее развитой в настоящее время с точки зрения практического применения, являются системы аэрогазового контроля (АГК) или аэрогазовой безопасности (АГБ) [3].

На данный момент времени многофункциональные системы безопасности не нашли широкого практического применения на рудных шахтах в силу уникальности и специфичности отдельных месторождений. Однако отдельные части таких систем реализуются на тех рудниках, где имеют место определенные опасные факторы производства.

Для калийных рудников характерно наличие газового фактора при ведении горных работ. Исследования, проведенные при участии автора на калийных рудниках ОАО «Беларуськалий», подтверждают, что опасность представляет не только выделение метана в результате непосредственного ведения горных работ, но и наличие его высоких концентраций в выработанном пространстве рудников.

На рис. 1 приведен пример развития горных работ горизонта -420 м рудника 3 Рудоуправления ОАО «Беларуськалий». На рисунке видно, какую часть шахтного поля