

УДК 622.43

Зайцев Артем Вячеславович,
кандидат технических наук,
научный сотрудник,
Горный институт УрО РАН
614007, г. Пермь, ул. Сибирская, 78 а
e-mail: aerolog.artem@gmail.com

Клюкин Юрий Андреевич,
инженер,
Горный институт УрО РАН
e-mail: aero_yuri@mail.ru

РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ РЕШЕНИЯ В СИСТЕМАХ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ РУДНИЧНОГО ВОЗДУХА*

Аннотация:

В статье представлены результаты разработки технических решений, обеспечивающих разработку ресурсосберегающих систем кондиционирования рудничного воздуха: использование высокоэффективных теплообменных аппаратов в подземных установках кондиционирования, распределенной подачи охлажденного воздуха и разработку систем кондиционирования на основе критерия оптимальности.

Ключевые слова: глубокие рудники, горные выработки, тепловой режим, теплообмен, математическое моделирование, источники тепловыделения, кондиционирование воздуха, микроклимат, воздухораспределение

Zaitzev Artem V.
candidate of technical sciences, researcher,
the Mining Institute, UB RAS
614007, Perm, Sibirskaya str., 78 a
e-mail: aerolog.artem@gmail.com

Klyukin Yuri A.
engineer,
The Mining Institute, UB RAS
e-mail: aero_yuri@mail.ru

RESOURCE-SAVING SOLUTIONS IN MINE AIR-CONDITIONING SYSTEMS

Abstract:

The article presents the results of working out technical solutions providing the development of a mine's resource-saving air-conditioning systems. The solutions include using high-efficient heat exchangers in underground conditioning units, distributed supply of cooling air and air-conditioning systems development based on the criterion of optimality.

Key words: deep mines, mine workings, thermal condition, heat transfer, mathematical modeling, sources of heat release, air conditioning, microclimate, air distribution.

В настоящее время запасов неглубоко залегающих и легкодоступных полезных ископаемых остается все меньше. В то же время спрос на них на мировых рынках неизменно растет. Поэтому для поддержания и увеличения мощности добычи горные предприятия вынуждены вовлекать в отработку все более труднодоступные и глубокозалегающие залежи с одновременным повышением интенсивности ведения горных работ. С увеличением глубины происходит увеличение температуры окружающего породного массива, усиливается влияние техногенных источников тепловыделения на формирование неблагоприятных микроклиматических условий. Примерами, когда уже остро стоит вопрос снижения температуры воздуха в рабочих зонах, являются шахта «Скалистая» и рудник «Таймырский» ОАО «ГМК «Норильский никель», где в ходе проведения температурных съемок были выявлены зоны с температурой воздуха, значительно превышающей 26°C, максимально разрешенной правилами безопасности [1].

Отдел аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН разрабатывает комплексные решения регулирования и нормализации микроклиматических условий шахт и рудников. Основой комплексного решения является сочетание горнотехнических и теплотехнических мероприятий в зависимости от специфики горного предприятия (глубины залегания рудных тел, технологии добычи полезного ископаемого, использования мощных двигателей внутреннего сгорания, твердеющей закладки и т. д.). Горнотехнические

* Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ №13-05-96013

мероприятия включают в себя непосредственно вентиляцию горных выработок, применение специальных теплообменных и теплоаккумулирующих выработок и камер, особых теплозащитных покрытий и крепей. Теплотехнические мероприятия предусматривают использование систем кондиционирования воздуха. Поскольку любые системы нормализации микроклиматических условий характеризуются значительными капитальными и эксплуатационными затратами, в современных условиях рыночной экономики остро стоит вопрос обеспечения ресурсосбережения при разработке систем кондиционирования рудничного воздуха.

Для обеспечения ресурсосбережения предложены следующие технические решения:

- построение комплексных систем кондиционирования воздуха, оптимально сочетающих горнотехнические и теплотехнические мероприятия регулирования теплового режима на основе критерия энергоэффективности;
- применение современных автоматизированных систем кондиционирования воздуха с высокоэффективными теплообменными аппаратами;
- использование способа распределенной подачи охлажденного воздуха, обеспечивающего минимальные тепловые потери при взаимодействии с источниками тепловыделения в горных выработках.

Разработанный критерий эффективности, используемый при построении подземных систем кондиционирования воздуха, таков [2]:

$$\sum \rho c Q \Delta T + 9,81 \cdot R Q^3 + E \rightarrow \min ,$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

c – удельная изохорическая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С);

R – аэродинамическое сопротивление выработки, кмюрг;

Q – расход воздуха по выработке, м³/с;

ΔT – разница температур между началом и концом выработки, °С;

E – холодопроизводительность систем охлаждения воздуха, кВт.

Суммирование в приведенном выражении производится по всем горным выработкам рудника. Первое слагаемое учитывает тепловые потери вследствие взаимодействия рудничного воздуха с источниками тепловыделения, второе – аэродинамические затраты на движение воздуха по горным выработкам, третье – эксплуатационные затраты на работу технических средств системы кондиционирования воздуха. Непосредственно построение системы кондиционирования осуществляется на базе метода вариантов, для сравнения эффективности используется представленный критерий. В результате для индивидуальных условий шахты или рудника разрабатывается оптимальное решение, отличающееся эффективностью и минимальным объемом затрат на реализацию.

На эффективность работы технических компонентов систем кондиционирования воздуха (СКВ), особенно в условиях подземных горных выработок шахт и рудников, влияет множество факторов. В частности, эффективность кондиционирования воздуха зависит от фактической схемы вскрытия, подготовки и технологии ведения горных работ, применяемых горных машин, интервала температурно-влажностных условий в подземных горных выработках, возможности размещения технических средств СКВ, химического и аэрозольного состава рудничной атмосферы, особенностей вентиляции и т. д.

В настоящее время сотрудниками отдела аэрологии и теплофизики Горного института УрО РАН совместно с научно-производственным объединением ООО «НПО «АэроСфера» разработан кондиционер шахтный раздельный (КШР), который предназначен для использования в автоматизированных системах регулирования температуры воздуха в шахтах, рудниках и иных подземных сооружениях, в том числе опасных по взрыву газов и пыли [3].

КШР представляет собой автономный шахтный кондиционер с возможностью самостоятельной установки входящих агрегатов (раздельный кондиционер). Одним из основных узлов кондиционера, от которого зависит эффективность работы всех составляющих агрегатов, является установка охлаждения воздуха с высокоэффективным теплообменником, обеспечивающим высокий отбор холода от холодоносителя к рудничному воздуху.

Геометрическая конструкция охлаждающих элементов кондиционера КШР отличается от конструкции нагревательных элементов калориферов формой. Теплообменники калориферов представляют собой змеевики, расположенные в плоскости поперек движения воздуха, а теплообменники кондиционера – объемные спирали (рис. 1), расположенные рядом поперек движения воздуха и наполовину вложенные друг в друга по ходу движения воздуха.

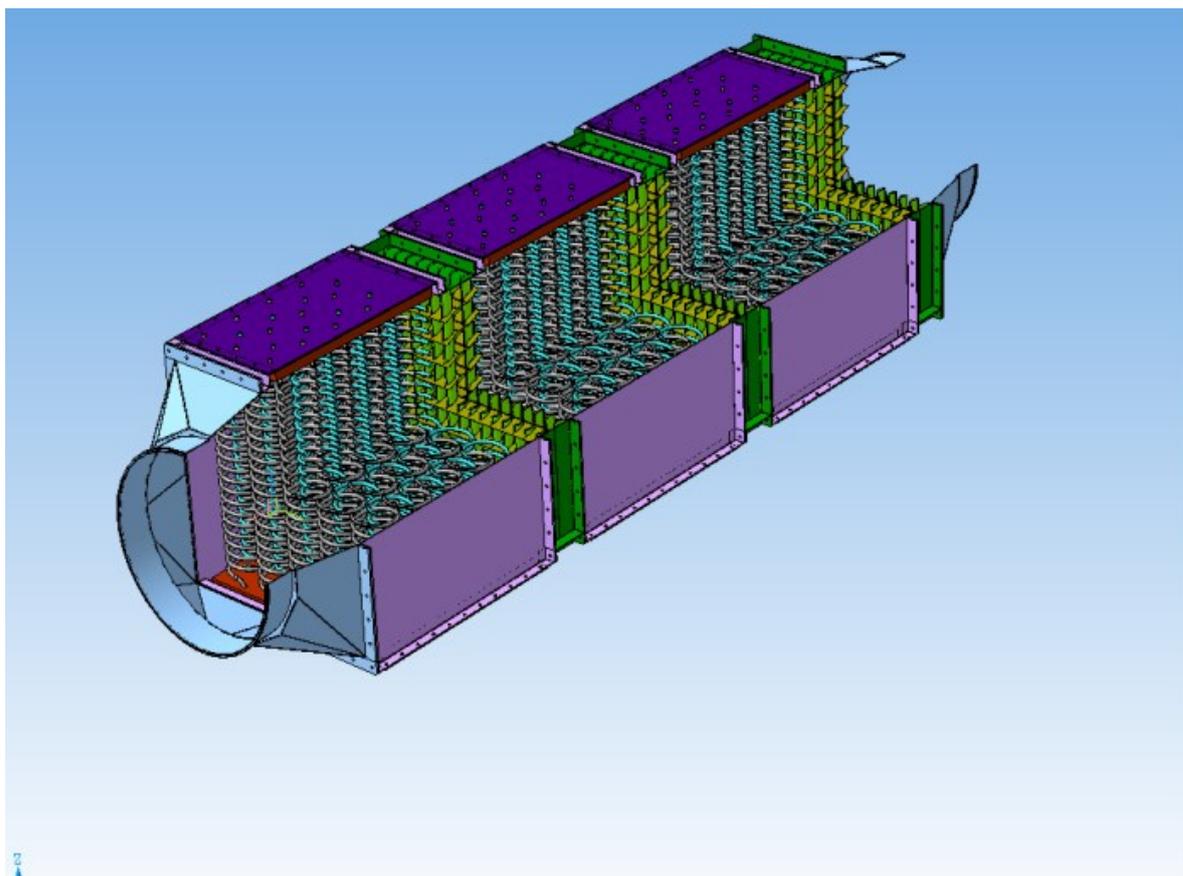


Рис. 1 – Воздухоохладитель кондиционера КШР

Особенности кондиционера, обеспечивающие его эксплуатационную эффективность, таковы:

- конструкция агрегатов позволяет применять неполный комплект агрегатов и их различные комбинации;

- в конструкции воздухоохладителей и охладителей воды не применяются медные или алюминиевые сплавы, что в атмосфере, содержащей серу или ее соединения, повышает надежность. Применены нержавеющие стали;

- применены гофрированные стальные трубы для змеевиков малого радиуса навивки, что обеспечивает высокие показатели при высокой запыленности и загазованности. Указанные конструкции легко поддаются очистке при необходимости. Блочная конструкция секций воздухо- и водоохладителей обеспечивает высокую ремонтпригодность и замену секции в условиях подземных выработок;

– конструкция воздухоохладителей обладает пониженным аэродинамическим сопротивлением, что обеспечивает подачу охлажденного воздуха на расстояние до 800 – 1000 м. Это позволяет подавать воздух в протяженные выработки без многократных перестановок агрегатов и размещения агрегатов вблизи от места работ;

– конструкция воздухоохладителя позволяет дополнительно увлажнять подаваемый воздух и использовать агрегат для снижения содержания пыли и ускоренной вентиляции выработок после буровзрывных работ;

– воздухоохладители могут работать как на фреоне, так и на воде с температурой от 0 до +5°.

Следующим этапом обеспечения ресурсосбережения является максимальное использование потенциала системы кондиционирования воздуха за счет снижения холодопотерь при движении воздуха от мест его охлаждения до подземных рабочих зон и увеличения зоны нормализации микроклиматических параметров. Для этого предложено использование принципа распределенной подачи охлажденного воздуха с целью обеспечения минимального температурного напора между рудничным воздухом и породным массивом.

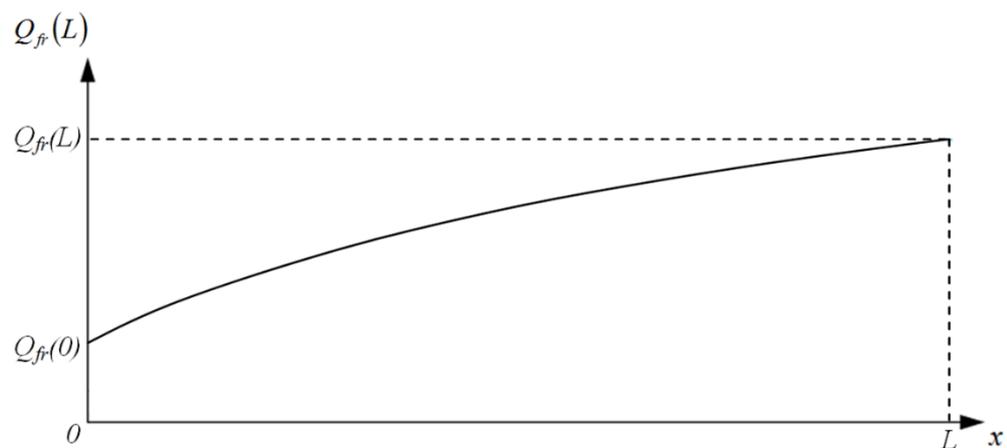


Рис. 2 – Зависимость интенсивности подачи воздуха в шахтную атмосферу от координаты

Для определения технических параметров распределенной подачи воздуха решена задача определения математической зависимости требуемого количества воздуха dQ от координаты по длине выработки dx (рис. 2). Для этого подача охлажденного воздуха в шахтную атмосферу принимается в рамках данной модели непрерывной по всей длине исследуемого участка. В результате решения поставленной задачи получены следующие зависимости [4, 5].

Температура воздуха в выработке T :

$$T = \frac{2LT_w\alpha + \rho c_v RT_{fr} \nu \cdot \log\left(1 + \frac{Q_{fr}}{Q_0}\right)}{2L\alpha + \rho c_v R\nu \cdot \log\left(1 + \frac{Q_{fr}}{Q_0}\right)},$$

где Q_0 – количество воздуха в шахтной атмосфере на начальном участке, кг/с;
 Q_{fr} – количество воздуха, поступающего в галерею по воздуховоду, кг/с;
 L – длина воздуховода, м;
 T_w – температура стенки выработки, °С;
 α – коэффициент теплообмена, Вт/м²·°С;
 ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 c_v – удельная изохорическая теплоемкость воздуха, Дж/(кг·°С);

R – радиус выработки, м;

T_{fr} – температура воздуха, поступающего в выработку, °С;

v – скорость движения воздуха, м/с.

Количество воздуха в выработке $Q(x)$:

$$Q(x) = Q_0 \left(1 + \frac{Q_{fr}}{Q_0} \right)^{\frac{x}{L}}.$$

Количество воздуха, поступающего в выработку $Q_{fr}(x)$:

$$Q_{fr}(x) = Q(x) - Q_0 = Q_0 \left[\left(1 + \frac{Q_{fr}}{Q_0} \right)^{\frac{x}{L}} - 1 \right].$$

Распределенная подача охлажденного воздуха характеризуется минимальной требуемой холодильной мощностью, так как обеспечивает минимальный температурный напор между воздухом и нагретыми горными породами.

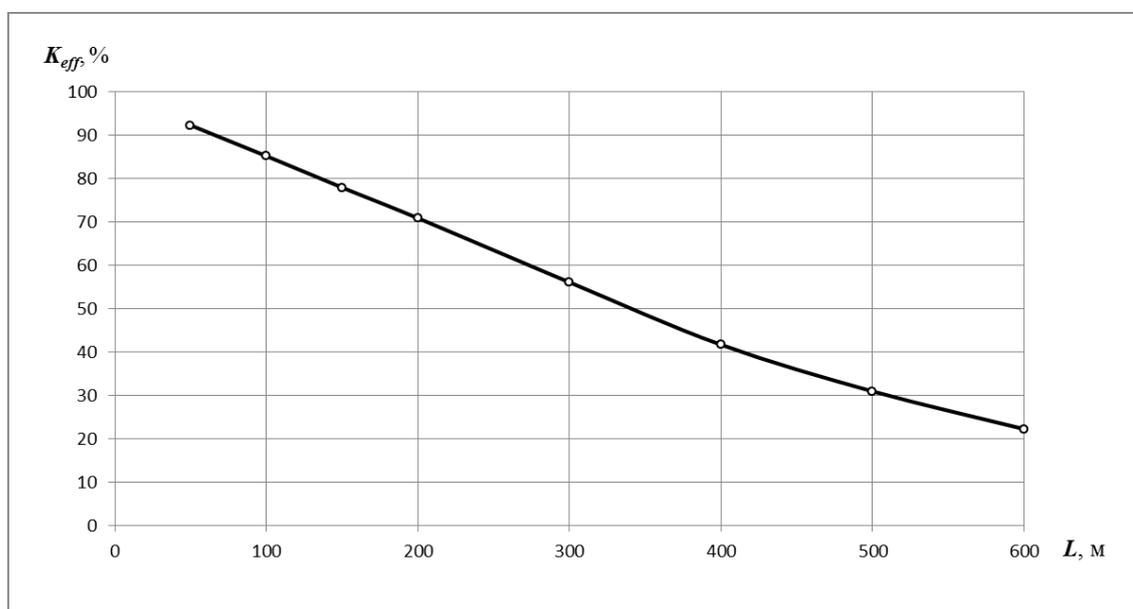


Рис. 3 – Зависимость эффективности использования холодильной мощности K_{eff} от расстояния между сосредоточенными струями охлажденного воздуха L

На практике реализация непрерывной подачи свежего воздуха является технически сложной и заменяется дискретной подачей через регулируемые отверстия в воздуховоде. Для оценки эффективности применяемых решений необходимо оценить эффективность использования холодильной мощности при различных значениях расстояния L между сосредоточенными струями охлажденного воздуха (рис. 3). Критерием эффективности использования холодильной мощности в данной системе является соотношение K_{eff} , определяющееся по следующей формуле:

$$K_{eff}(L) = \frac{Q_{x.p.}}{Q_{x.m.}} \cdot 100 \%,$$

где $Q_{x.p.}$ – холодильная мощность модели системы кондиционирования с дискретной подачей свежего воздуха в рабочие зоны (характеризуется расстоянием между воздухораспределительными отверстиями L), кВт;

$Q_{x.m.}$ – холодильная мощность теоретической модели системы непрерывной распределенной подачи свежего воздуха в рабочие зоны, кВт.

Детальные расчеты с учетом особенностей топологии вентиляционной сети, аэродинамических и теплофизических параметров ее участков выполняются в программно-вычислительном комплексе «АэроСеть». В результате находится массив значений температуры, влажности и скорости движения воздуха в каждой точке исследуемой вентиляционной сети. Полученные в результате моделирования данные позволяют уточнить принятые технические решения.

Комплекс проведенных исследований и разработанных технических решений позволяет увеличить эффективность нормализации микроклиматических параметров в условиях шахт и рудников с неблагоприятным тепловым режимом.

Литература

1. Особенности формирования микроклиматических условий в горных выработках глубоких рудников / В.Н. Карелин и др. // Горный журнал. — 2013. - № 6.
2. Казаков Б.П. Современные подходы к разработке способов управления тепловым режимом рудников при высокой температуре породного массива / Б.П. Казаков, Л.Ю. Левин, А.В. Зайцев // Горный журнал. — 2014. - № 5.
3. Левин Л.Ю. Разработка шахтной подземной установки кондиционирования воздуха для условий глубокого рудника «Таймырский» // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2012 г. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2013.
4. Ключкин Ю.А. Разработка систем кондиционирования воздуха протяженных рабочих зон в условиях неблагоприятного теплового режима нефтешахт // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегодной научной сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2013 г. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2014.
5. Щербань А.Н. Руководство по регулированию теплового режима шахт: 3-е изд., перераб. и доп. / А.Н. Щербань, О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко. — М.: Недра, 1977. — 359 с.