

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт технической теплофизики

На правах рукописи

ЗИМИН Леонид Борисович

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ
ЭНЕРГОРЕСУРСОВ В СИСТЕМАХ НОРМАЛИЗАЦИИ
МИКРОКЛИМАТА ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

(05.14.04 - Промышленная теплоэнергетика)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Киев - 1995

НА
Україні

1.311.22

АВ 33.092
АВ 33.122

- 2 -

Диссертация

ЛНБ України ім.В.Стефаника

Работа выполнена в Инсти
Национальной Аак



00761281 (P)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук

АВЕРИН Геннадий Викторович

доктор технических наук,
профессор

БЕЗРОДНЫЙ Михаил Константинович

доктор технических наук,
профессор

ХУДЕНКО Анатолий Андреевич

Ведущая организация - Киевский зональный научно-исследовательский
институт экспериментального проектирования ("КиевЗНИИЭП")
Госкомградостроительства Украины

Защита состоится "14" *ноября* 1995 г. в 14⁰⁰ час.
на заседании Специализированного ученого совета Д 50.04.02 по за-
щите диссертаций на соискание ученой степени доктора технических
наук в Институте технической теплофизики Национальной Академии
наук Украины по адресу: 252057, г. Киев-57, ул. Желябова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН Украины.

Автореферат разослан "4" *октября* 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук

КРИВОШЕЙ Ф. А.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тенденция размещения объектов самого различного назначения в естественных, отработанных и специально сооружаемых полостях земной коры сопровождается усложнением условий эксплуатации подземных сооружений (ПС). Под влиянием технологических особенностей объектов и естественного температурного поля Земли при постоянном углублении действующих шахт возрастает энергопотребление систем нормализации микроклимата (СНМ) и ухудшаются соответствующие технико-экономические показатели проектных решений. Особенности функционирования объектов довольно часто налагают ряд ограничений на интенсивность тепломассообменных и аэродинамических процессов, что затрудняет достоверное прогнозирование микроклимата и проектирование рациональных СНМПС, поскольку существующие расчетные методики базируются на допущениях, обоснованных для наблюдающихся в шахтах типичных сочетаний мощности источников и стоков теплоты и массы. При новых сочетаниях назначения и условий размещения объектов создаются недостаточно изученные ситуации с определяющим влиянием на протекание этих процессов ряда естественных и техногенных факторов, которые могли бы использоваться в качестве потенциальных ресурсов энергосбережения в СНМПС. Поэтому тема диссертационной работы актуальна. Она вытекает из задач освоения подземного пространства, возникающих при развитии научно-технического прогресса, и непосредственно связана с программами исследований, выполняющихся в отделе горной теплофизики ИТТФ НАН Украины по заказам соответствующих ведомств и организаций.

Целью работы является развитие и адаптация к новым условиям функционирования ПС существующего теоретического и методического аппарата, разработка и оценка эффективности энергосберегающих технических решений СНМПС и их элементов на базе научно обоснованных методов тепловых расчетов.

Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

- исследование резервов энергосбережения в СНМПС;
- уточнение методов расчета процесса тепломассообмена применительно к новым типичным ситуациям;
- разработка автоматизированных систем управления вентиляцией метрополитенов по тепловому фактору;
- исследование и разработка методов расчета естественного

проветривания и воздухораспределения в нагорных ПС;

- разработка методов прогноза микроклиматических условий в выработках, проветриваемых сжатым воздухом;

- разработка способов и средств активной теплоизоляции и тепловой защиты выработок;

- исследование и разработка устройств для утилизации тепловой энергии вентиляционных выбросов ПС;

- исследование энергетической эффективности и разработка рекомендаций по практическому использованию предложенных решений.

Идея работы состоит в создании энергосберегающих способов и средств нормализации микроклимата ПС на основе комплексного использования естественных и техногенных энергоресурсов.

Метод исследования. Аналитические исследования и вариантные расчеты процессов тепломассообмена вентиляционного воздуха с горным массивом, экспериментальные исследования микроклимата в натуральных условиях горных выработок ПС различного назначения.

Достоверность полученных результатов подтверждается соответствием расчетных и экспериментальных данных, использованием апробированных методов исследований, удовлетворительным согласованием результатов работы с опубликованными данными других авторов.

Научная новизна работы заключается в результатах теоретического, экспериментального и расчетного анализа характеристик процессов тепло- и массообмена вмещающего ПС горного массива с потоками влажного воздуха в протяженной цилиндрической полости при колебаниях температуры и влагосодержания потоков, изменчивости давления сред во входном и выходном сечениях, а также при теплообмене потоков между собой. На основе полученных данных расширены известные и составлены новые представления об особенностях течения этих процессов:

- описание нестационарного теплообмена воздуха и массива при гармонических колебаниях температуры потока уточнено и упрощено применительно к условиям метрополитенов и тоннелей;

- впервые предложены методы расчета объемов естественного проветривания и воздухораспределения в каналах и сетях нагорных ПС, основанные на одновременном учете топологии, изменчивости наружных условий и нестационарности внутреннего теплообмена;

- для выработок с низкой относительной влажностью воздуха обоснован метод итерационного решения систем уравнений баланса теплоты и массы, применимый в различных ПС и предусматривающий расчетное определение интенсивности массообмена на основе уравне-

ний в числах подобия, соответствующих условиям процесса;

- разработаны уточненные описания теплообмена в каналах, осложненного увлажнением стенок, периодическим переключением потоков, наличием термосифонов, активной теплоизоляции и роторных теплообменников с обратимыми фазовыми превращениями рабочих тел.

Практическая ценность работы заключается в разработке научно обоснованных методов определения основных технических и режимных параметров для проектирования и эксплуатации энергосберегающих СНМ и их элементов применительно к различным ПС:

- обоснованы способы регулирования по тепловому фактору и нормализации тепловлажностного и вентиляционного режимов транспортных и гидротехнических ПС с рациональным использованием теплоаккумулирующих свойств вмещающих пород, действия напорной фильтрации и потока рабочей воды;

- предложены методы определения гарантированных минимальных объемов естественного проветривания ПС, размещаемых в местностях с гористым рельефом, а также принцип расчета воздухораспределения в сложных сетях выработок подземных комплексов при наличии нескольких аэродинамических связей с земной поверхностью;

- разработаны методы прогноза параметров микроклимата сквозных и тупиковых выработок, учитывающие условия тепломассообмена при выпуске сжатого воздуха в целях вентиляции;

- обоснован принцип и разработаны способы и устройства активной сезонной теплоизоляции и тепловой защиты горных выработок на базе термочувствительных элементов переменного объема с обратимыми фазовыми превращениями наполнителей;

- доказана рациональность утилизации низкопотенциальной тепловой энергии исходящих из ПС вентиляционных потоков путем организации прямого их теплообмена с подаваемым вентиляционным воздухом с применением предложенных способов и устройств, в том числе бесприводных саморегулирующихся утилизаторов, роторы которых вращаются под действием утилизируемой тепловой энергии;

- определены энергетическая и технико-экономическая эффективность предложенных решений и разработаны рекомендации по их практическому использованию.

Эксплуатация разработанных и внедренных технологий и СНМ транспортных, гидротехнических и энергетических ПС сопровождается существенным (до 40%) снижением энергозатрат за счет использования таких факторов, как теплоаккумулирующая способность вмещающего горного массива, аэростатический тепловой напор, гидростати-

ческий напор холодной воды, охлаждающее и осушающее действие расширяющегося сжатого воздуха. Самостоятельное практическое значение для разработки экономических СНМПС имеют методы создания средств активной сезонной теплоизоляции, тепловой защиты и крепления выработок с знакопеременным температурным режимом на базе термочувствительных элементов, а также способы утилизации низкопотенциальной тепловой энергии вентиляционных выбросов ПС.

Реализация результатов исследований. Большинство теоретических и методических результатов реализованы путем включения в 3 методических руководства для проектирования, представляющих собой ведомственные нормативные документы Минуглепрома и Минэнерго б. СССР. Кроме того, результаты внедрены и использованы: институтом "Киевметрострой" при принятии генерального компоновочного решения и выборе системы вентиляции Крымского автодорожного тоннеля большой протяженности; Московским метрополитеном (на нескольких линиях) в виде автоматизированной системы управления работой тоннельной вентиляции по тепловому фактору с двумя модификациями алгоритма; Киевским метрополитеном (на двух линиях) в виде энергосберегающей технологии проветривания тоннелей и станций по графикам, учитывающим изменчивость тепловой нагрузки; Свердловским горным институтом при разработке новой конструкции вентилятора для метрополитенов в части способов и пределов регулирования его производительности; Таджикским управлением "Гидроспецстрой" (г. Душанбе) при нормализации микроклимата в выработках строящихся подземных комплексов Байпазинской и Рогунской ГЭС, а также ПС действующего Нурекского гидроузла; институтом "Средазгидропроект" (г. Ташкент) при принятии компоновочных решений и выборе СНМ подземного комплекса Рогунской ГЭС для пускового и эксплуатационного периодов; производственным объединением "Якутуголь" (г. Нерюнгри) при выдаче институту "Сибгипрошахт" задания на проектирование шахт Южной Якутии (в части утилизации тепловой энергии); комплексным НИИ по проблемам Центрального района Донбасса (ДонНИИ, г. Горловка) при выборе схем вентиляции и способов освоения новых глубоких горизонтов.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на втором и пятом пленарных заседаниях Международного Бюро по горной теплофизике в г. г. Пловдив (НРБ, 1983) и Нью-Дели (Индия, 1988); на 24 Международной конференции по безопасности работ в горной промышленности в г. Донецке (1991); на Международной конференции по автоматизации горной промышленности

в Силезском горном университете (Польша, 1995); на второй Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы горной теплофизики" в г. Ленинграде (1981); на второй научно-технической конференции и третьем Всесоюзном научно-техническом симпозиуме "Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках большого объема" в г. Кохтла-Ярве (1979 и 1983); на Всесоюзном семинаре "Проблемы разработки ресурсосберегающих технологий отработки месторождений полезных ископаемых Севера" в г. Якутске (1988); на периодических тематических сессиях Всесоюзного научного семинара по горной теплофизике в г.г. Стаханов (1982), Днепропетровск (1983), Киев (1984, 1985 и 1987), Якутск (1986), Донецк (1988), Сланцы (1988), Житомир (1989), Владикавказ (1989), Яремче (1990), Владивосток (1991) и Путивль (1992, 1993); на заседаниях Межведомственного координационного совета по разработке нового вентилятора для метрополитенов в г. Москве (1985 и 1986); на конференции "Пути и методы ускорения научно-технического прогресса на метрополитенах страны" в г. Москве (1987); на научно-техническом совещании "Опыт проектирования и строительства туннеля Арпа-Севан и вопросы переброски в озеро других водотоков" в г. Ереване (1982); на научных семинарах отдела горной теплофизики ИТФ НАН Украины.

Публикации и авторские свидетельства по материалам работы.

Результаты работ автора по теме диссертации опубликованы в 43 печатных работах (в том числе в 3 ведомственных нормативных документах), кроме того, автором получено 28 свидетельств на изобретения и 2 патента.

Личное участие автора состоит в разработке основной идеи диссертации, постановке и решении задач, в выполнении натурных экспериментальных исследований и разработке расчетных методик. Автору принадлежат также анализ и обобщение результатов исследований. Положения созданных и опубликованных в соавторстве с коллегами и использованных в диссертации статей и изобретений принадлежат автору на основе равноправного партнерства.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, восьми глав и заключения. Она содержит 269 страниц машинописного текста, а также 72 рисунка и 21 таблицу, список 377 использованных источников на 37 страницах и приложения на 82 страницах.

Автор защищает

- уточненные описания тепломассообмена вентиляционного воздуха с вмещающим горным массивом в особых условиях транспортных,

гидротехнических и энергетических ПС;

- математические модели, алгоритмы и информационную базу АСУ вентиляционным режимом метрополитенов по тепловому фактору с использованием теплоаккумулирующих свойств массива;

- способы учета влияния рельефа и изменчивости наружных факторов на внутренний теплообмен, естественное проветривание и воздухораспределение в нагорных ПС при наличии нескольких аэродинамических связей с земной поверхностью;

- методы расчета интенсивности тепло- и массообмена в сквозных и тупиковых выработках энергостроительства;

- способы прогноза параметров микроклимата в выработках, проветриваемых сжатым воздухом;

- принципы и способы активной теплоизоляции и тепловой защиты выработок на базе термочувствительных элементов, а также требования к их наполнителям;

- результаты исследований и технические решения регенеративной утилизации низкопотенциальной тепловой энергии вентиляционных выбросов ПС;

- методы и результаты оценки эффективности разработанных решений и рекомендации по их реализации.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении охарактеризованы актуальность темы диссертационной работы и ее целевая направленность, связь проведенных исследований с тематикой НИР отдела горной теплофизики ИТФ НАН Украины, научная новизна и практическая ценность результатов, а также степень личного участия автора и разработанности темы. Приведены основные положения, выносимые автором на защиту, показан объем внедрения и использования результатов исследований.

Первая глава посвящена обзору состояния исследований и практического опыта в области нормализации микроклимата ПС, анализу возникающих типичных ситуаций с наличием и определяющим влиянием на энергопотребление СНМПС ряда естественных и техногенных факторов, а также обоснованию задач диссертационной работы.

Основной исходной научной базой при выполнении работы послужили труды А. Н. Щербаня, О. А. Кремнева, А. Ф. Воропаева, Ю. Д. Дядькина, В. П. Черняка, В. Я. Журавленко, В. Н. Скубы, Г. А. Калабина, Ю. В. Шувалова. При исследованиях частных вопросов использовались работы Г. В. Аверина, М. К. Безродного, А. Ф. Галкина, С. Г. Гендлера, Ю. П. Доб-

рянского, Э.Н.Малашенко, Б.И.Медведева, В.А.Кузина, В.Б.Скряпникова, В.И.Толубинского, А.Р.Ферта, А.А.Худенко, Ю.А.Цейтлина, В.Я.Цодикова, В.А.Шелиманова, М.М.Энкашева, Л.Д.Жарраса, А.Халла, К.Мингао, И.Мужичека, Р.Рамсдена, Е.Ван дер Уолта.

Приведено описание современных тенденций расширения разнообразия условий и целей использования подземного пространства и соответствующего спектра горнотеплофизических особенностей функционирования ПС. Для некоторых случаев отмечено определяющее влияние на работу СНМПС принципиально новых сочетаний условий тепломассообмена воздуха с горным массивом. По данным ряда исследователей, подтвержденным результатами натурных экспериментов, проведенных автором в ПС различного назначения, в тепловом и влажностном балансе выработок заметную роль приобретают как малозначительные для шахт и рудников, так и отсутствующие в них источники и стоки теплоты и массы. Это теплоаккумулирующая способность горного массива и активной теплоизоляции при колебаниях температуры потока вентиляционного воздуха, естественный аэростатический тепловой напор, обусловленный внутренними и внешними процессами, гидростатический напор и охлаждающий потенциал водохранилищ, аэродинамическое действие потока рабочей воды ГЭС и транспортных средств, охлаждающий и осушающий эффект при выпуске сжатого воздуха и т.д. В силу существенных отличий условий протекания процесса тепломассообмена в таких ПС от наблюдающихся в шахтах существующие методики нуждаются в уточнении.

При рассмотрении физико-технических основ расчета параметров микроклимата подземных сооружений отмечена невозможность строгого решения основных исходных уравнений сформулированной А.В.Лыковым обобщенной математической модели, описывающих перенос энергии, массы и импульса силы, а также физическое состояние вещества. Перечислены сложности аналитического решения задач нестационарной теплопроводности и допущения, принимаемые различными авторами при создании эмпирико-аналитических методик для практических расчетов. При этом во многих случаях при решении многофакторной задачи прогноза термовлажностных условий в выработках вследствие крайне низкой точности определения большинства исходных данных использование решений, максимально близких к аналитическим, приводит к столь значительной погрешности результатов, что преимущества строгой постановки девальвируются. Поэтому необходимо обоснованное сочетание уровня сложности формулирования условий задачи с использованием эмпирических зависимостей.

Проанализированы особенности развития СНМПС, отличающихся в первую очередь высокой энергоемкостью. Рассмотрена связь условий размещения и функционирования с формированием микроклимата метрополитенов, транспортных и гидротехнических тоннелей, комплексов ГЭС, а также прочих ПС, располагаемых в районах с гористым рельефом и аномальным климатом. Установлена необходимость коррекции методики расчета теплообмена воздуха и массива в метрополитенах с учетом колебаний температуры потока и цикличности источников.

В тоннелях аккумулятивное теплоты в массиве определяющим образом влияет на точность расчета аэроэстатического теплового напора. При этом необходимо учитывать и специфику термодинамического состояния наружного воздуха в приземном слое атмосферы, поскольку разность давления у порталов тоннеля обусловлена совместным действием как техногенных внутренних, так и естественных наружных факторов.

В нагорных подземных ГЭС с высотными плотинами напорный фильтрационный поток холодной воды обуславливает однородность температурного поля массива. Этот техногенный фактор представляет собой мощный сток теплоты и может быть использован для нормализации теплового режима ПС с интенсивным тепловыделением, отведение которого обычными средствами затруднено. Для таких объектов характерны и внешние особенности, в частности аномально низкая влажность наружного воздуха, изменяющаяся при его подаче в ПС значительно интенсивнее, чем в шахтах. Это не позволяет воспользоваться имеющимся методическим арсеналом и статистическими данными, поскольку упрощения основаны на малой изменчивости высокого уровня влажности. При этом увеличение потенциала массопереноса также представляет собой заметный резерв энергосбережения в СНМПС. Низкой влажностью воздуха объясняются и недопустимо высокие расхождения результатов расчетов по действующим методикам с данными натурных измерений на глубоких горизонтах шахт Центрального района Донбасса (ЦРД), где широко используется пневматическая энергия и расширившийся сжатый воздух с низким начальным влагосодержанием составляет 15-25% общего объема вентиляционной струи. Использование этого техногенного фактора для кондиционирования нуждается в расчетном обосновании.

Особенности формирования параметров приземного слоя атмосферы на разных склонах гор определяют давление у порталов сложных подземных комплексов. Это напрямую связано с энергозатратами и

надежностью СНМПС. Поэтому одной из задач работы является создание методов расчета естественного проветривания и воздухораспределения в вентиляционных сетях ПС, учитывающих совместное действие внутренних и внешних факторов.

Использование естественного холода и вторичных энергоресурсов для нормализации микроклимата ПС, расположенных в районах с суровым климатом, исследовано достаточно подробно. Однако налицо резервы снижения энергозатрат путем тепловой защиты многолетнемерзлого массива, особого крепления выработок и утилизации теплоты вентиляционных выбросов. Перспективна разработка средств нормализации микроклимата, использующих термочувствительные элементы в виде емкостей переменного объема с наполнителями, обратимо изменяющими свойства при сезонных колебаниях температуры. Это позволит повысить эффективность СНМПС за счет естественного холода. Основным препятствием использованию для искусственной обработки подаваемого воздуха такого техногенного фактора, как теплота вентиляционных выбросов ПС, является низкий температурный напор, недостаточный для эффективного теплообмена. Один из возможных путей развития этого направления - создание высокоэффективных компактных теплообменных устройств с изменением площади поверхности теплообмена и аэродинамического сопротивления каналов, с использованием теплоты фазовых превращений, а также с автоматическим переключением потоков и непрерывным перемещением насадки между потоками с помощью вращающихся теплообменников.

Анализ практики нормализации микроклимата ПС и состояния исследований аэродинамических и тепломассообменных процессов показал наличие резервов энергосбережения. Результаты изложенных в первой главе исследований позволили систематизировать сведения о потенциальных естественных и техногенных энергоресурсах СНМПС в виде табл.1, а также позволили обосновать вышеприведенные цель работы и задачи исследований.

Вторая глава посвящена оценке потенциальных ресурсов тепловой энергии СНМПС. Обобщена и уточнена применительно к расширенному кругу задач классификация способов использования естественных и техногенных энергоресурсов. Проанализирован энергетический потенциал нетрадиционных источников и их влияние на микроклимат.

Возможность прямого использования ветровой энергии для вентиляции ПС, располагаемых в районах с достаточным ее потенциалом, оценена применительно к конкретным условиям расположенной на возвышенном берегу океана шахты "Беринговская". Предложена ветровая

Таблица 1
Виды потенциальных энергоресурсов систем
нормализации микроклимата подземных сооружений

NN пп	Типы сооружений	Виды и названия энергоресурсов естественные	техногенные
1	Метрополитены	теплоаккумулирующая способность массива	тепловыделение и поршневое действие подвижного состава
2	Транспортные тоннели	теплоаккумулирующая способность массива, аэроостатический тепловой напор	тепловыделение и поршневое действие подвижного состава
3	Гидротехнические тоннели	гидростатический напор, охлаждающее действие потока воды	механическое действие потока воды
4	Нагорные подземные комплексы	теплоаккумулирующая способность массива, аэроостатический напор, изменчивость атмосферного давления	тепловыделение оборудования, напорная фильтрация холодной воды
5	Угольные шахты Центрального района Донбасса	аэроостатический тепловой напор	охлаждающее и осу- шающее действие расширяющегося сжатого воздуха
6	Сооружения зоны сурового климата	теплоаккумулирующая способность массива, ветровая энергия	теплоаккумулирующая способность актив- ной теплоизоляции, исходящие вентиля- ционные потоки

эжекторная установка, создающая разрежение, под действием кото-
рого шахта проветривается в минимально допустимом объеме. Для
ускорения ветрового потока предложен круговой конфузор с острой
входной кромкой и профилем образующей по зависимости

$$R_1 = \frac{R_3}{\sqrt{1 - \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_3}\right)^2\right] \cdot \frac{[1 - (X/L)^2]^2}{1 + 0.01 \cdot (X/L)^2}}}, \quad (I)$$

где R_1 - текущее значение радиуса образующей в произвольном попе-
речном сечении на расстоянии X по оси от входного сечения; R_2 и
 R_3 - радиусы входного и выходного отверстий; L - длина.

Однако даже в районе с максимальным потенциалом ветровой энергии гарантированный объем проветривания объекта практически втрое ниже требуемого. Поэтому применение ветрового эжектора ограничено периодами технологического цикла шахты.

Оценено влияние гидростатического напора и охлаждающего потенциала рабочей воды подземных ГЭС на вентиляционный и тепловой режим. Напорная фильтрация холодной воды из водохранилища преобразует сложное температурное поле массива, характеризуемое естественной температурой t_{no} , в однородное, определяемое температурой фильтрующейся воды t_{ϕ} . При поступлении в ствол теплого сухого воздуха на увлажненной стенке возникает специфический случай встречного направления процессов тепло- и массообмена. Горный массив в процессе испарения энергетически не участвует и его прогрев на глубину X так же, как и адиабатическое испарение происходит за счет уменьшения "сухой" части энтальпии воздуха. Поэтому температура стенки $t_{ст}$ может быть принята равной температуре воздушного потока по мокрому термометру t_m .

Таким образом, выполняется условие

$$t_{no} \approx t_{\phi}; t_{ст} \approx t_m. \quad (2)$$

Плотность теплового потока на поверхности раздела может быть выражена описанием как теплопроводности в массиве по закону Фурье

$$q = -\lambda \cdot \frac{dT}{dX}, \quad (3)$$

так и конвективного теплообмена при граничных условиях III рода

$$q = \alpha \cdot (t_n - t_{ст}). \quad (4)$$

В рассматриваемом случае изменение температуры массива dT в выражении (3) на расстоянии X от стенки упрощенно представляет собой ее линейное уменьшение от значения $t_{ст}=t_m$ до $t_{no}=t_{\phi}$, иначе

$$q = \left| \frac{\lambda \cdot (t_m - t_{\phi})}{X} \right|. \quad (5)$$

На основании (4) и (5) для грубой количественной оценки квазистационарной теплопроводности в массиве можно записать

$$X = \frac{\lambda \cdot (t_m - t_{\phi})}{\alpha \cdot (t_n - t_m)}. \quad (6)$$

Для типичных условий летнего режима в реальных ПС значение X не превышает 0.3 м, т.е. возмущения, вносимые в температурное поле водонасыщенного массива, незначительны по сравнению с таковыми в условиях глубоких шахт. В сочетании с наличием информации о температуре стенки это позволяет при расчетах объектов оценивать их тепловое взаимодействие с массивом по зависимости

$$q = \alpha \cdot (t_b - t_n). \quad (7)$$

Вопрос о массообмене в таких условиях рассмотрен ниже.

Проанализирована практика использования потенциала рабочей воды высоконапорных ГЭС для целей охлаждения и побуждения движения вентиляционного воздуха в ПС. Установлена возможность разработки технических решений, существенно увеличивающих энергетическую эффективность рационального использования этого фактора.

Рассмотрены методы учета влияния колебаний температуры потока на его нестационарный теплообмен с массивом в устьевых частях ПС различного назначения. При использовании известного решения А. Н. Щербаня и О. А. Кремнева основная сложность заключается в определении величины поправки ΔK_t к "фоновому" значению коэффициента нестационарного теплообмена K_{t_0} . Ряд решений о запаздывании температурной волны сопоставлен между собой и с результатами экспериментальных наблюдений. Установлено определяющее влияние на результат расчета выбора момента начала отсчета времени проветривания и предложено выражение для определения его расчетной величины в соответствии с физическим смыслом процесса и текущей фазой сезонных колебаний метеопараметров. Преодолена неопределенность, возникавшая при совпадении значений температуры внутри и снаружи ПС, расчетные зависимости приведены к виду, удобному для программирования. Описание нестационарного теплообмена массива с потоком переменной температуры уточнено и упрощено применительно к реальным в условиях метрополитенов и тоннелей диапазонам изменения исходных данных. Таким образом получены предпосылки для более точного учета теплоаккумулирующих свойств массива. В дальнейшем это описание использовано при разработке алгоритма автоматизированной системы управления работой тоннельной вентиляции метрополитенов по тепловому фактору.

Оценен энергетический потенциал исходящих из ПС вентиляционных потоков. Согласно различным данным, в аномально суровых или жарких климатических условиях энергетический потенциал вентиляци-

онных выбросов глубоких ПС по отношению к окружающей среде существенно (примерно в 5 раз) выше количества теплоты, отданного или воспринятого породами при прохождении воздушного потока по цепи выработок. Иначе говоря, выбрасываемая в атмосферу доля энергии, полученной наружным воздухом при его нагреве или охлаждении перед подачей в ПС, достигает 80%. Для районов с суровым климатом о потенциале исходящих потоков можно судить по данным рис. 1, иллюстрирующего не в календарных, а в абсолютных величинах распределение во времени года климатических данных и температуры подаваемого в ПС и удаляемого из него вентиляционных потоков. Потенциальная экономия энергозатрат на подогрев воздуха за счет теплообмена между ними характеризуется частью площади графика между кривыми 1 и 4, и значение ее тем больше, чем суровее климат и эффективнее теплообменник. Установлена принципиальная возможность утилизации низкопотенциальной тепловой энергии вентиляционных выбросов путем организации прямого их теплообмена с подаваемым в ПС воздухом.

Третья глава посвящена исследованию теплового режима метрополитенов и разработке энергосберегающей технологии его регулирования средствами вентиляции. Создание и поддержание нормативных значений термовлажностных параметров микроклимата в тоннелях и на станциях Московского метрополитена осложнено напряженностью движения, разнообразием условий проветривания и недостаточной обоснованностью графиков работы вентиляционных агрегатов. Разрозненность сведений об опыте эксплуатации СНМПС обусловила необходимость проведения серии натурных исследований параметров микроклимата, для чего ранее разработанная для шахтных условий методика эксперимента скорректирована в отношении схем размещения пунктов измерения температуры, относительной влажности и особенно скорости движения воздуха и дополнена способами косвенной оценки влияния частоты движения и размеров пассажиропотока. В качестве объектов натурных исследований выбраны наиболее характерные перегоны Калужско-Рижской линии, являвшейся первичным объектом разработки и внедрения АСУ работой тоннельной вентиляции по тепловому фактору.

Результаты натурных экспериментов в дальнейшем были дополнены массивами информации введенных в эксплуатацию систем автоматического контроля температуры и влажности воздуха, температуры окружающего грунта и удельной плотности потоков теплоты и массы на поверхности раздела воздуха и массива. Был выявлен и изучен ряд закономерностей и особенностей формирования микроклимата, которые

учитывались при разработке метода теплового расчета, основанного на уточненном в главе 2 математическом описании.

Управление работой тоннельной вентиляции метрополитена осуществлено с помощью ЭВМ, выдающей на основании результатов периодических расчетов рекомендации (управляющие сигналы) для изменения режимов работы конкретных вентиляторов. В основе алгоритма, включающего стыковочные операции по согласованию режимов работы оборудования на соседних расчетных участках линии, лежит периодическое решение уравнения теплового баланса для каждого из участков. В результате определяется теоретически необходимое по тепловому фактору количество вентиляционного воздуха, идентифицируемое с режимными возможностями оборудования. Для расчетного участка линии использовано предложенное В.П. Черняком балансовое уравнение

$$G \cdot (I_2 - I_1) = K\tau \cdot F \cdot [t_n + 0.5 \cdot \delta \cdot l \cdot \sin \psi - 0.5 \cdot (t_1 + t_2)] + k_b F_b \cdot [t_b - 0.5 \cdot (t_1 + t_2)] + A \cdot G \cdot l \cdot \sin \psi + \Sigma Q_T, \quad (8)$$

где G - массовый расход воздуха; $I_{1,2}$ - энтальпия воздуха соответственно в начале и в конце участка по ходу потока; $K\tau$ - коэффициент нестационарного теплообмена; F - площадь поверхности теплообмена воздуха и грунта; t_n - естественная температура грунта в начале участка; δ - геотермический градиент; l - длина уклонов в пределах участка; ψ - угол наклона трассы к горизонту; $t_{1,2}$ - температура воздуха, поступающего на участок (наружного) и уходящего; $k_b F_b$ и t_b - коэффициент теплопередачи, площадь поверхности и температура внутри подвижного состава; ΣQ_T - суммарное тепловыделение на участке; A - тепловой эквивалент работы.

Выражение (8), преобразованное после упрощений относительно неизвестного расхода воздуха, использовано для расчетов необходимой по тепловому фактору производительности вентиляции.

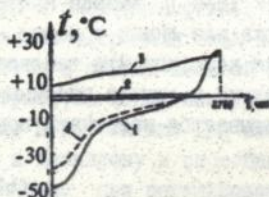
$$G = \frac{\Sigma Q_T + k\tau \cdot F \cdot [t_n - 0.5 \cdot (t_1 + t_2)]}{I_2 - I_1} \quad (9)$$

Для определения величины ΣQ_T на основании статистической обработки различных массивов данных получено эмпирическое выражение

$$\Sigma Q_T = \frac{5000 \cdot F \cdot S \cdot n}{R \cdot G_0} + \Sigma Q_n \quad (10)$$

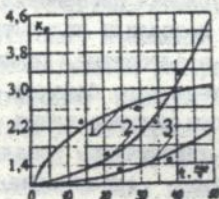
где S и R - площадь и эквивалентный радиус сечения; n - среднесуточная частота движения; G_0 - производительность вентиляторов; ΣQ_n - тепловыделение пассажиров.

Рис. 1. Изменение во времени температурного потенциала вентиляционных потоков



температура воздуха:
1 - наружного, 2 - подаваемого в ПС, 3 - исходящего, 4 - наружного, подогретого в утилизаторе

Рис. 2. Ориентировочная зависимость коэффициента K_n от интенсивности движения



1, 2 - тоннель при встречном и попутном движении поездов и вентиляционного потока; 3 - станция.

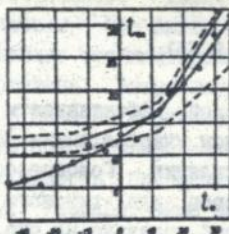


Рис. 3. Зависимость температуры воздуха на платформах от температуры наружного воздуха

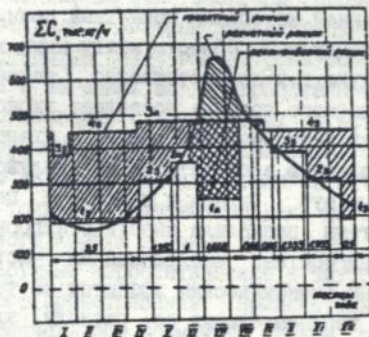


Рис. 4. Энергопотребление на вентиляцию типового участка линии Мосметрополитена

Безразмерный комплекс $W = F \cdot S \cdot n_{\text{ч}} / (R \cdot G_0)$ назван критерием тепловой напряженности расчетного участка или линии в целом.

Скорректирован и способ определения коэффициента теплоотдачи α на стенках. Влияние на теплообмен воздуха и грунта вносимых поездами аэродинамических возмущений учитывается введением понятия эффективной скорости потока

$$\bar{V} = K_p \cdot V_{\text{расч}} \quad (11)$$

где K_p - коэффициент увеличения скорости; $V_{\text{расч}} = G_0 / (\rho \cdot S)$;
 ρ - плотность воздуха.

Балансовые расчеты, выполненные на условия проведения нами и другими авторами натурных экспериментов, позволили получить зависимость K_p от $n_{\text{ч}}$ (рис. 2), реализованную в алгоритме. Таким образом, уточнена зависимость составляющих теплового баланса от интенсивности движения. Оценка эффективности регулирования осуществляется по степени отклонения значений температуры воздуха на платформах $t_{\text{пл}}$ от теоретически необходимых, определяемых с помощью полученного полуэмпирического выражения (рис. 3)

$$t_{\text{пл}} = \exp(0.025 \cdot t_{\text{н}} + 2.55). \quad (12)$$

Методика определения энергетической эффективности системы отработана на идеализированном расчетном участке линии со средними условиями и характеристиками вентиляции. Годовое сокращение энергопотребления в приводах вентиляторов для типового отрезка линий Мосметрополитена "станция-перегон" показано на рис. 4. Кривая описывает изменение в течение года необходимого расхода воздуха. Верхней ступенчатой линией изображен проектный режим работы вентиляции, а нижней - рекомендуемый. Область между ними характеризует экономию расхода воздуха, и соответственно, потребляемой мощности. Применение предлагаемого графика позволяет экономить до 55% электроэнергии. Годовой экономический эффект, утвержденный при приемке системы в промышленную эксплуатацию на Калужско-Рижской линии, составил 344 тыс.руб. (здесь и далее - в ценах до 1992 г.) Эксплуатация системы позволила внести в алгоритм ряд корректив. Новая редакция алгоритма, внедренная на участке Замоскворецкой линии с годовым экономическим эффектом 98 тыс.руб., предусматривает определение тепловыделения по расходу электроэнергии на тяговых подстанциях.

По результатам специальных натурных исследований влияния поездов на распределение воздуха по соседним тоннелям внесены уточ-

нения в информационную базу систем (массивы номинальных расходов воздуха и электроэнергии). Эксперименты проводились на Московском и Киевском метрополитенах под координацией Свердловского горного института в рамках Целевой Комплексной Программы (ЦКП) МПС СССР по разработке новой конструкции вентилятора для метрополитенов. Участие в выполнении ЦКП состояло в разработке технических требований к диапазону и способам изменения производительности такого вентилятора при регулировании. Для возможных сочетаний климатических и горногеологических условий с технологическими характеристиками метрополитенов были определены крайние значения необходимого по тепловому фактору количества воздуха. Установлено, что внутрисуточные изменения тепловыделения в ПС метрополитена являются дополнительным резервом энергосбережения в приводах тоннельной вентиляции. Применительно к условиям Киева на этом основании разработаны диспетчерские графики работы конкретных вентиляторов. Для наклонных участков трассы и участков с заметным уклоном земной поверхности были также учтены данные экспериментального изучения естественного движения воздуха. Измерения температуры грунта показали, что внедрение предложенной технологии проветривания позволило стабилизировать температурный уровень ПС Киевского метрополитена. Энергозатраты на вентиляцию снижены на 39% по сравнению с базовым вариантом, что на 6,8 % превышает экономию, достигаемую при регулировании по среднесуточным параметрам. Годовая эффективность внедрения на Киевском метрополитене составила 115 тыс. руб. Разработанные по результатам этих исследований рекомендации по регулированию производительности нового вентилятора в пределах от 100 до 45% внедрены головным разработчиком на заводе-изготовителе с долевым экономическим эффектом 41 тыс. руб.

В четвертой главе рассмотрены особенности нормализации микроклимата в нагорных ПС. Разработаны способы оценки и рационального использования специфических естественных факторов, обусловленных гористым рельефом поверхности. Особое внимание уделено определению движущих сил и объемов естественного проветривания.

Для тоннелей с двумя выходами на поверхность по разные стороны горного хребта впервые предложена система уравнений, связывающая наружные аэростатические и внутренние тепловые условия естественного проветривания. Применительно к строительству автодорожного тоннеля под Крымскими горами, располагаемая разность значений атмосферного давления у порталов приравнена аэродинамическому сопротивлению, а в описании теплообмена между вентиляционной

методом неопределенности. Это позволяет рассчитать и оценить возмоз-

струей и массивом учтены сезонные колебания ее температуры

$$\left\{ \begin{aligned} (H_{\text{а.с.}} - H_c) \cdot (\rho_{\text{м}} - \rho_c) + (H_c + \Delta H) \cdot (\rho_{\text{м}} - \rho_{\text{т}}) &= a_1 \frac{UL}{S^3} \left(\frac{G}{\rho_{\text{т}}} \right)^2; \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\left\{ \begin{aligned} t_2 &= \frac{F t_{\text{п}} K_{\text{т}} - (2FK_{\text{т}} - G) t_1 - Gr(X_2 - X_1) + \Sigma Q}{(2FK_{\text{т}} + G) c_p} \end{aligned} \right. \quad (14)$$

где H - геодезическая высота, a_1 - коэффициент аэродинамического сопротивления, U и S - периметр и площадь сечения тоннеля, L - его длина, F - площадь поверхности теплообмена, ρ , c_p , G , t и X - плотность, теплоемкость, расход, температура и влагосодержание воздуха, ΣQ - тепловыделение внутренних источников, $K_{\text{т}}$ - коэффициент нестационарного теплообмена (индекс "т" - тоннель, прочие соответствуют расположению порталов).

Система решена относительно расхода и температуры воздуха итерационным методом, что позволило обосновать уменьшение объема горных работ и снижение мощности вентиляции на 15%. Рекомендации переданы институту "Киевметропроект", расчетная эффективность составила 815 тыс.руб/год. Методика усовершенствована различными авторами, предложившими способы расчета совместного действия принудительной вентиляции и естественной тяги для подобных ПС.

Уравнение (14) является модификацией разработанного для инженерных расчетов тоннелей и других ПС упрощенного способа теплового расчета горных выработок, использующего линейную аппроксимацию закона изменения влагосодержания воздуха в зависимости от изменения его температуры. Для определения коэффициентов аппроксимации в произвольном интервале температуры метод снабжен номограммой. При известных значениях параметров воздуха на входе и законе изменения в ней относительной влажности воздуха его температура на выходе из выработки определяется по выражению

$$t_2 = (A \cdot t_1 + B) / B, \quad (15)$$

где $A = 1 - 0.5 \cdot E$; $E = K_{\text{т}} \cdot F / (G \cdot c_p)$; $B = 1 + 0.5 \cdot E + 2.45 \cdot n \cdot \phi_2$;
 $B = E \cdot t_{\text{а.с.}} + 2.45 \cdot (X_1 - m \cdot \phi_2) + \Sigma Q / (G \cdot c_p)$.

Ожидаемые значения влажности воздуха на выходе из строящихся тоннелей ϕ_2 на основании статистического обобщения данных натурных исследований ряда авторов могут определяться по выражению

$$\phi = 1 - L^{(0.15 \cdot L \cdot 10^{-4})} \quad (16)$$

Значительные трудности представляет учет естественных факторов при расчетах СНМ сложных подземных комплексов, строящихся в условиях гористого рельефа и имеющих несколько выходов на поверхность. Азростатический расчет предполагает определение плотности столбов наружного воздуха над порталами, для чего необходимо все-сторонне изучить условия размещения объекта, уточнить высоту расположения в атмосфере условной изобарической поверхности и значения вертикального температурного градиента в приземном слое для соответствующих горных склонов. Это выполнено на примере строительства подземного комплекса Рогунской ГЭС на р. Вахш. По гидрометеорологической методике учтены морфометрические показатели рельефа и их влияние на климат района, что позволило на основании реперных экспериментальных наблюдений определять температуру воздуха в произвольных точках склонов. Движущая сила естественного проветривания по условию равновесия в нижней точке расчетной схемы определена как разность давлений у порталов. Для периода эксплуатации объекта установлено, что зимой его проветривание может быть полностью обеспечено естественным побуждением, а в жаркое время года при совместном действии естественной тяги и системы принудительной вентиляции ее расчетная производительность может быть обосновано уменьшена.

Размещение ПС в условиях гористого рельефа обуславливает ряд особенностей и при проведении горных выработок, что потребовало корректировки разработанных ранее методов расчета тупиковых горных выработок (ТГВ). На основании экспериментальных исследований термовлажностных параметров в выработках, проводимых в подобных условиях, внесены уточнения в расчеты тепловыделения и теплопередачи через стенку воздухопровода охлажденного воздуха, а также в определение времени проветривания и ожидаемых значений относительной влажности воздуха. Для различных схем проветривания и вариантов размещения воздухоохладителя предложены методы прямых и обратных тепловых расчетов. На условия экспериментов в тупиковых выработках гидростроительства выполнены расчеты, показавшие хорошее совпадение измеренных и рассчитанных значений температуры.

В условиях аномально жаркого и сухого климата в воздухоподающих выработках, поверхность стенок которых увлажнена холодной водой, помимо теплообмена с массивом, оцениваемого по выражению (7), происходит интенсивное испарительное охлаждение воздуха, для расчета количественных показателей которого существующие шахтные методики непригодны. Это подтверждается расчетной оценкой коэффи-

циента массоотдачи, выполненной с использованием соответствующих уравнений массообмена в числах подобия по разработанной для выработок с низкой относительной влажностью воздуха методике совместного итерационного решения уравнений баланса теплоты и массы. Интенсивность потока массы в воздухоподающем стволе Рогунской ГЭС, определенная как графоаналитически с использованием I-X диаграмм, так и с помощью ПЭВМ, на порядок превосходит значения, рекомендуемые шахтными методиками. При этом получено следующее соотношение, которое может использоваться при пересчете от используемого в диффузионном числе подобия Нуссельта значения коэффициента массоотдачи β' (отнесенного к разности объемных концентраций) к используемому известными методиками значению коэффициента β (отнесенного к разности парциальных давлений)

$$\beta = \beta' \cdot 2.164 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{\frac{p_{\text{пс}}}{273 + t_{\text{пс}}} - \frac{p_{\text{пот}}}{273 + t_{\text{пот}}}}{p_{\text{пс}} - p_{\text{пот}}} \quad (17)$$

Для решения задачи определения объемов естественного проветривания в сложных сетях подземных комплексов, имеющих в условиях гористого рельефа несколько выходов на поверхность, не могут быть непосредственно использованы шахтные методики расчета воздухо-распределения, основанные на теории графов. Метод такого расчета с учетом нестационарности внутренних тепловых процессов и изменчивости наружных условий сформулирован в виде системы уравнений воздушного и теплового баланса в произвольной сети, включающей "1" подземных выработок (ветвей), "n" узлов или порталов и "k" естественных аэростатических тепловых напоров или устанавливаемых в определенных ветвях сети вентиляторов:

$$\begin{cases} \sum^n G_1 = 0; & (18) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sum^n k_{11} \cdot G_1^2 - \sum^k h_{1t} + \sum^n k_{21} = 0; & (19) \end{cases}$$

$$\begin{cases} t_{21} = (A_1 \cdot t_{1t} + B_1) / B_1; & (20) \end{cases}$$

$$\begin{cases} h_{1t} = \gamma_1 \cdot G_1^2 / (\rho_{\text{ср1}} \cdot R_{\text{г1}} \cdot T_{\text{ср1}}); & (21) \end{cases}$$

$$\text{Здесь } k_{11} = \gamma_1 \cdot R_{\text{г1}} \cdot T_{\text{ср1}} / (0.1 \cdot B_{\text{ср1}})^2. \quad (22)$$

$$k_{21} = (g \cdot \Delta h_1 / (R_{\text{г1}} \cdot T_{\text{ср1}})) \text{ Sign } G_1; \quad (23)$$

$\gamma_1 = \alpha_1 \cdot U_1 \cdot L_1 / S_1^3$ - аэродинамическое сопротивление выработки;
 $R_{\text{г1}}$ - газовая постоянная; $T_{\text{ср1}}$ и $B_{\text{ср1}}$ - среднеарифметические температура и давление воздуха в соответствующих столбах

$T_{ср1} = 0.5 \cdot (T_{11} + T_{21})$; $V_{ср1} = V_{узла(портала)} \pm \delta \cdot \Delta h_1$;
 Δh_1 - разность высот начала и конца выработки; $\rho_{ср1}$ - плотность
 воздуха в выработке $\rho_{ср1} = 0.1 \cdot V_{ср1} / (R_{г1} \cdot T_{ср1})$.

В отличие от известных методик система уравнений, включающая уравнение баланса расходов в узле сети (18) и уравнение баланса напоров в контуре (19), дополнительно содержит уравнение (20), отражающее зависимость температуры воздушного потока в конце выработки от его параметров в ее начале, а также уравнение (21), отражающее связь расхода воздуха в выработке с его плотностью и естественным аэростатическим тепловым напором или напором вентиляторов. Неизвестны взаимосвязанные значения расхода, направления движения и средней температуры воздуха в каждой из выработок, а также напора в каждом из узлов сети. Совместное решение уравнений (18)-(21) сводится к отысканию значений и направлений величины G для каждой 1-ой выработки сети, удовлетворяющих этим уравнениям и заданному начальному распределению термовлажностных параметров и давлений воздуха у порталов. Задача решалась совместно с "Орг-энергостроем" и Горным Институтом Кольского филиала АН СССР с использованием искусственного приема, заключающегося в замене наружных аэродинамических связей между порталами комплекса фиктивными выработками с сопротивлениями, равными соответствующим разностям давлений, что позволяет замкнуть систему. С помощью варьирования значений $h_{1г}$ в результате решения системы впервые получено обоснованное воздухораспределение с обоснованным учетом теплообмена внутри ПС и климатических факторов. Результаты расчета удовлетворительно согласуются с данными экспериментальных наблюдений в сети выработок строящегося Рогунского комплекса ПС.

На основании полученных теоретических результатов для подобных объектов предложены энергосберегающие решения СНМПС. В частности, для использования в пусковой период такого техногенного фактора, как гравитационный напор рабочей воды, предложено подавать воздух в ПС по колодцу, наращиваемому по мере отсыпки плотины над подходной выработкой, а отводить его в зону интенсивного разрежения, образующегося в месте выхода воды из щели регулирующего затвора. Это позволяет проветривать строящиеся комплексы нагорных подземных ГЭС без электроэнергии. Решения СНМПС предусматривают также использование охлаждающего потенциала потока рабочей воды и греющего потенциала отепленной воды систем охлаждения технологического оборудования. Согласно одному подаваемым в ПС воз-

дух охлаждается циркулирующей водой. а теплообмен через продольную перегородку в стволе увеличивает естественную тягу, под действием которой проветривается одна из групп подземных помещений. Второй вариант, реализованный в СНМПС Рогунской ГЭС, позволяет сократить объемы горных работ и более, чем в два раза уменьшить необходимую тепловую мощность, для чего летом поток подаваемого в ствол воздуха разделяют, направляя одну часть его по центральному каналу, а другую - по периферийному кольцевому каналу, определяя количество воздуха в нем по соотношению

$$G_k = \beta \frac{F \cdot (p_n^{ст} - p_n)}{X_2 - X_1}, \quad (24)$$

полученному из уравнения баланса массы в пристеночном потоке. Воздух, пропускаемый по центральному каналу, охлаждают рабочей водой в установленном в нижней части ствола теплообменнике и смешивают с воздухом из периферийного канала. Зимой используют только центральный канал и в том же теплообменнике подогревают воздух отпеленной водой охлаждения гидрогенераторов. Это позволяет снизить материал- и энергоемкость СНМПС и обеспечить требуемые параметры воздуха при любых климатических условиях. Комплексная энергосберегающая СНМ внедрена с долевым экономическим эффектом 150 тыс. руб. в год. Кроме того, предложено и передано заводу-изготовителю решение охлаждения зазора между статором и ротором гидрогенераторов расширяющимся сжатым воздухом.

Пятая глава посвящена исследованиям эффективности применения сжатого воздуха для проветривания глубоких шахт ЦРД. С этой целью также разработаны методы итерационного совместного решения уравнений баланса теплоты и массы, поскольку в выработках, проветриваемых частично или полностью сжатым воздухом, начальные значения и темп роста относительной влажности потока существенно отличаются от наблюдающихся при обычном проветривании шахт.

Для выработок со сквозным проветриванием предложена система балансовых уравнений теплоты и влаги на расчетном участке

$$\left\{ \begin{aligned} G \cdot \Delta t &= k_t \cdot F \cdot (t_{по} - 0.5 \cdot (t_1 + t_2)) + \Sigma Q_n - \Sigma Q_x \pm Q_{сж}; \end{aligned} \right. \quad (25)$$

$$\left\{ \begin{aligned} X_2 &= X_{расч} + \Delta X. \end{aligned} \right. \quad (26)$$

Здесь G - расход воздуха, принимаемый равным сумме частей вентиляционного воздуха $G_{вент}$ и расширившегося сжатого воздуха $G_{сж}$, поступающего как из выпускных отверстий пневмоприводов, так и

дросселируемого из пневмосети без совершения работы; ΔI - изменение энтальпии воздуха; $X_{\text{расч}}$ - начальное влагосодержание смеси рудничного и расширившегося сжатого воздуха, средневзвешенное для соответствующих количеств

$$X_{\text{расч}} = \frac{X_{\text{сж}} \cdot G_{\text{сж}} + X_{\text{вент}} \cdot G_{\text{вент}}}{G_{\text{сж}} + G_{\text{вент}}}, \quad (27)$$

при этом начальное влагосодержание расширившегося сжатого воздуха принимается равным влагосодержанию насыщенного воздуха при температуре t_1 и барометрическом давлении B на глубине выработки H , деленному на степень сжатия, т.е.

$$X_{\text{сж}} = X_{\text{н}}(t_1, B) \cdot \frac{B}{P_1}. \quad (28)$$

Из (25) получаем

$$t_2 = \frac{A_1 \cdot t_{\text{по}} + (1 - 0.5A_1) \cdot t_1 - \Delta X \cdot \gamma / c_p + \Sigma Q / (G \cdot c_p) \pm 0.01 \cdot \Delta H}{1 + 0.5 \cdot A_1}, \quad (29)$$

где $A_1 = \kappa \cdot F / (G \cdot c_p)$; $\Sigma Q = \Sigma Q_{\text{н}} + \Sigma Q_{\text{х}}$; $\Sigma Q_{\text{х}} = c_p \cdot (G_{\text{сж1}} \cdot \Delta t_{\text{др}} + G_{\text{сж2}} \cdot \Delta t_{\text{отр}})$.

Величина ΔX , представляющая собой приращение влагосодержания воздуха, может быть определена, как

$$\Delta X = \frac{W \cdot F}{G}, \quad (30)$$

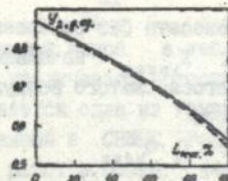
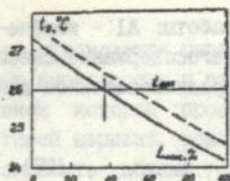
где W - удельный поток массы с поверхности испарения, площадь которой F в первом приближении принята равной $U \cdot Z$.

На основании известного уравнения в числах подобия и с учетом (17) получено соотношение

$$W = 5.7 \cdot 10^{-6} \cdot \nu^{0.8} \cdot \left(\frac{U}{S} \right)^{0.2} \left(\frac{B_{\text{е}}}{B} \right)^{0.57} \left(\frac{P_{\text{нас}}}{T_{\text{нел}}} - \frac{P_{\text{н}}}{T_{\text{ср}}} \right). \quad (31)$$

Расчетный анализ (рис. 5) различных вариантов проветривания лавы свидетельствуют, что сжатый воздух оказывает весьма ощутимое комфортное воздействие, растущее с увеличением его доли в потоке. В условиях примера нормализация микроклимата в лаве с помощью сжатого воздуха энергетически оказывается втрое эффективнее, чем в случае применения передвижного кондиционера.

По той же причине невозможности адекватного отражения с помощью известных методик разработан метод прогноза термовлажност-



----- выпуск
сжатого воздуха
только дроссели-
рованием,
- - - - - частичное
расходование в
пневмоприводах

Рис. 5. Влияние доли сжатого воздуха в вентиляционном потоке на его параметры в конце лавы

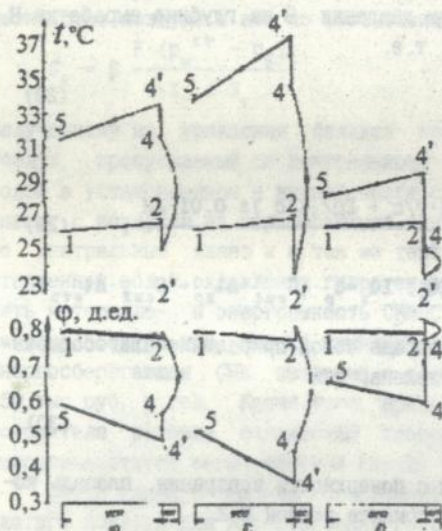
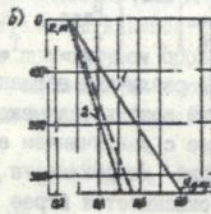
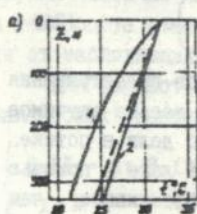


Рис. 6. Параметры воздуха в тупиковой выработке с вихревой трубой у призбойного пространства

- температура;
- относительная влажность

- а) $\eta = 0.15$, $\Sigma Q_{пп} = 10$ кВт;
б) $\eta = 0.5$, $\Sigma Q_{пп} = 10$ кВт;
в) $\eta = 0.5$, $\Sigma Q_{пп} = 1$ кВт.

Рис. 7. Результаты теплового расчета воздухоподающего ствола Рогунской ГЭС



- а) температура,
б) относительная влажность
1 - расчет по "Единой методике...";
2 - расчет по предлагаемому методу.
- - - - - графоаналитический расчет

ных параметров в ТГВ с установленной в конце воздухопровода вихревой трубой, в которой сжатый воздух разделяется на холодную и горячую части. Холодная часть направляется в воздухопровод, где смешивается с подаваемым воздухом, а горячая - в свободное пространство выработки, где смешивается с уходящим. В соответствии со спецификой этой схемы внесены дополнения в исходные системы балансовых уравнений ранее предложенных методов тепловых расчетов. Допущение в описании теплообмена через стенку воздухопровода, позволяющее сократить число совместно решаемых уравнений и обоснованное ранее для ТГВ глубоких шахт Донбасса, тем более справедливо для рассматриваемой схемы, заведомо допускающей повышение температуры воздуха, благодаря чему температурный напор между массивом и воздухом минимизируется. В этом случае температура и влажность воздуха в характерных пунктах выработки определяются путем двухэтапного итерационного расчета, выполняемого сначала совместно для воздухопровода и призабойного пространства, где в отличие от (31) величина W определяется по зависимости

$$W = 3.65 \cdot 10^{-6} \cdot V_{\text{заб}}^{0.67} \cdot R_s^{-0.33} \cdot \left(\frac{P_{\text{нас}}}{T_{\text{исп}}} - \frac{P_{\text{н}}}{T_{\text{сп}}} \right), \quad (32)$$

а затем - для участка сквозного проветривания подобно (25)-(31) с учетом теплообмена с воздухопроводом.

Аналогичный анализ (рис. 6) при различных сочетаниях объемов вентиляционного и сжатого воздуха дает основания заключить, что реализация подобной схемы позволяет нормализовать температурно-влажностные условия при сравнительно небольших энергозатратах, а экономичные режимы определяются с помощью предложенного метода путем варьирования характеристик вентилятора и вихревой трубы.

Разработанные методики переданы Комплексному научно-исследовательскому и проектно-конструкторскому Институту по проблемам ЦРД и используются им при обосновании технических решений нормализации микроклимата.

В шестой главе описана разработка термочувствительных способов и устройств, реализующих предложенный принцип сезонной теплоизоляции и тепловой защиты воздухоподающих выработок, расположенных в многолетнемерзлом горном массиве. Основной объединяющей идеей этих технических решений является использование герметичных емкостей переменного объема (в том числе с эластичными оболочками), содержащих легкокипящие наполнители, претерпевающие при теплообмене с вентиляционным потоком обратимые фазовые превращения.

Эти емкости названы термочувствительными крепежными элементами (ТКЭ). С сезонным повышением температуры наполнитель вскипает и давление в ТКЭ повышается, чем вызывается увеличение их объема. При последующем сезонном понижении температуры вентиляционной струи наполнитель конденсируется и объем ТКЭ уменьшается. Использование этого эффекта позволяет периодически создавать из множества ТКЭ в крепежном или заопалубочном пространстве сплошной слой теплоизоляции. В расчетном интервале температуры воздуха процесс обратим и при правильном выборе рабочих характеристик предложенные способы и конструкции позволяют увеличить теплоаккумулирующую способность выработок и сгладить пульсации температуры; создать слой эффективной теплоизоляции, защищающей многолетнемерзлый горный массив от контакта с теплым воздухом; обеспечить необходимое направление теплового потока, доступ холодного воздуха к массиву и равномерность горного давления на крепь. Работа устройств не требует энергозатрат и происходит в автоматическом режиме, за счет саморегулирования.

С целью выбора потенциальных наполнителей ТКЭ проанализированы свойства ряда химических соединений, температура кипения которых при нормальном давлении находится в пределах 261...271 К, и сформулированы основные требования к наполнителям: большая удельная теплота парообразования; минимальная теплопроводность и максимальное давление паров; химическая нейтральность и термическая стойкость. Оценена безопасность применения некоторых углеводородов и фторсодержащих соединений в шахтах и определены коэффициенты в уравнениях, аппроксимирующих зависимость давления насыщения их паров от температуры.

В главе описаны разработанные на уровне изобретений способы и конструкции теплоизолирующего крепления, термочувствительных опалубок и защитных экранов. Она также включает описания теплоизолирующего анкерного крепления с автоматическим прерыванием и восстановлением теплового контакта между находящимися в массиве и в выработке частями (за счет использования обратимого фазового превращения "плавление-затвердевание"), способа защиты от обмерзания вентиляторной установки, а также конструкций двух устройств - органов регулирования шахтного микроклимата, также использующих фазовые превращения рабочих тел: регулятора температуры воздушного потока и устройства для изоляции выработки.

Ряд упомянутых разработок передан институтам "ДальвостНИИ-проект" и "Сибгипрошахт" для реализации в проектах новых угольных

шахт Южной Якутии.

Седьмая глава содержит описание разработанных также на уровне изобретений технических решений утилизации низкопотенциальной тепловой энергии вентиляционных выбросов ПС. Предложенные устройства основаны на применении теплопередающих перегородок (в том числе трансформируемых и с термосифонами), минимизирующих суммарные затраты на проветривание и искусственную тепловую обработку воздуха. Для поддержания температуры насыщения паров наполнителя на уровне изменяющейся во времени и по длине перегородок средней температуры подаваемого и исходящего вентиляционных потоков предложено техническое решение манометрической коррекции объема термосифонов при помощи вогнутых круговых биметаллических мембран, для температурных характеристик которых получено выражение

$$X = \frac{a \cdot \Delta t^b}{Z^c}, \quad (33)$$

где $\Delta t, ^\circ\text{C}$ - возможное изменение $t_{\text{ср}}$; Z - безразмерный комплекс, характеризующий соотношение геометрических размеров устройства

$$Z = \frac{n \cdot K \cdot R^2}{V_0}$$

Здесь n - число мембран в термосифоне, K и R - начальный прогиб и радиус мембран, V_0 - начальный объем паровой фазы в термосифоне. Для реального диапазона изменений входящих в (33) параметров и наиболее применимых в условиях сурового и жаркого климата наполнителей определены численные значения коэффициентов a, b, c .

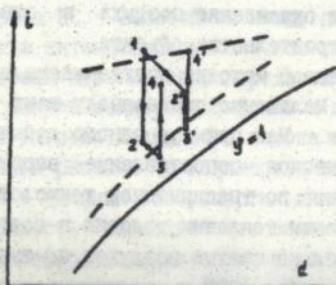
С целью интенсификации теплообмена между подаваемым и исходящим вентиляционными потоками через разделяющие их перегородки предложено устанавливать в последних вращающиеся теплообменники. При этом за счет непрерывного перемещения массы теплоемкой насадки между потоками постоянно поддерживается максимальный температурный напор, что позволяет уменьшить размеры и аэродинамическое сопротивление устройств. Разработаны три конструкции компактных роторных теплообменников, не требующих механического привода и регулирующих устройств, поскольку вращение их роторов происходит по мере теплообмена за счет утилизируемой тепловой энергии путем создания вращающего момента при перемещениях рабочего тела, претерпевающего обратимые фазовые превращения. Для определения возможных областей применения наиболее перспективного из предложен-

ных технических решений в настоящее время проводятся лабораторные исследования макетного образца. На принципе самовращения за счет радиально перемещающихся под действием тепловой энергии масс промежуточного теплоносителя (воды), а также утяжеленных свободных торцов емкостей переменного объема (сильфонов) основаны и две другие предлагаемые конструкции роторных регенеративных теплообменников-утилизаторов, которые могли бы наиболее эффективно использоваться при утилизации теплоты потоков уходящих газов котельных установок, промышленных печей, и т.п., температура которых составляет около 450 К. Приводится также описание основанного на том же принципе теплового привода.

Восьмая глава работы посвящена расчетному обоснованию и анализу энергетической и экономической эффективности предложенных в предыдущих главах технических и технологических решений.

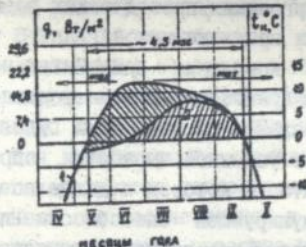
С использованием изложенной в главе 4 методики расчета тепло- и массообмена теплого сухого воздуха с увлажненной холодной водой поверхность выработок выполнен прогноз теплового и влажностного режима воздухоподающего ствола и основных ПС Рогунской ГЭС, а также определена необходимая тепловая мощность оборудования для искусственного охлаждения воздуха. На рис. 7 приведено сопоставление результатов прямого теплового расчета изменения параметров воздуха при его движении по стволу, выполненного по различным методикам. Результаты расчета по предлагаемой методике (с определением значений коэффициента массоотдачи) практически совпадают с наиболее достоверными данными графоаналитического расчета. Для наиболее характерной из ветвей воздухораспределения подземного комплекса выполнены обратные тепловые расчеты и определена необходимая холодопроизводительность. Рис. 8 иллюстрирует в I - X координатах сопоставление процессов изменения термодинамических параметров воздуха при различных вариантах размещения воздухоохладителя. Из результатов расчетов и рис. 8 следует явная предпочтительность подземного размещения теплообменника, необходимая тепловая мощность которого в этом случае составляет 604 кВт против 1342 кВт в сравниваемом варианте. Экономия эксплуатационных расходов достигается за счет рационального использования испарения влаги со стенок ствола, протекающего интенсивнее при контакте с неохлажденным и сухим воздухом, а капитальных затрат - за счет обоснованного снижения объемов горных работ при уменьшении площадей поперечного сечения выработок и за счет применения вентиляторов и теплообменников меньшей производительности. Разработанные

Рис. 8. Процессы изменения состояния воздуха в комплексе ПС Рогунской ГЭС при различных вариантах размещения теплообменника



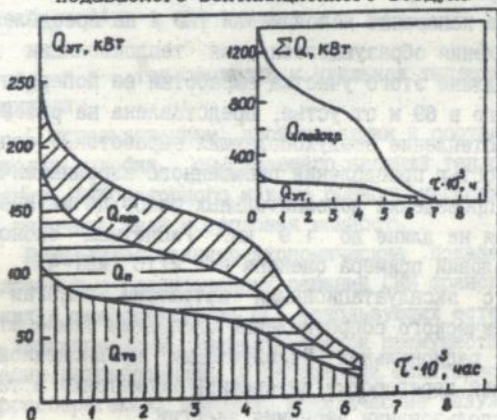
1-2 и 2'-3' - искусственное охлаждение в теплообменнике,
2-3 и 1-2' - адиабатическое увлажнение в стволе,
3-4 и 3'-4' - нагрев от технологического тепловыделения,
----- - границы нормируемой зоны

Рис. 9. Динамика изменения и баланс составляющих теплового потока на контуре условной выработки.



1 - данные Аркагалинской метеостанции и удельная плотность теплового потока в 69 м от устья,
2 - граница зон расходования греющего потенциала подаваемого воздуха:
//////// - на вскипание наполнителя,
//////// - на прогрев теплоизоляции и массива

Рис. 10. Сезонное изменение затрат и экономии энергии на подогрев подаваемого вентиляционного воздуха



на основании выполненных исследований энергосберегающие технические решения для комплекса ПС Рогунской ГЭС, использующие естественное проветривание, гравитационный и охлаждающий потенциал рабочей воды, а также испарительное охлаждение воздуха в стволе, включены в рабочую документацию строительства объекта.

С помощью разработанных в главе 5 методик подтверждена высокая эффективность предложения Э.Н.Малашенко по переводу шахт ЦРД на проветривание сжатым воздухом. На примере одного добычного участка проведено технико-экономическое сопоставление вариантов освоения новых глубоких горизонтов: по традиционной технологии и в случае проветривания и нормализации тепловых условий в подготовительных и очистных выработках только сжатым воздухом по тупиковой схеме. Исчисленный в ценах октября 1993 г. экономический эффект от внедрения этого предложения только на одном добычном участке превысил 7 миллиардов карбованцев. При этом 93% экономии обеспечивается снижением объемов энергоемких проходческих работ.

При расчетном анализе одного из предложенных в главе 6 технических решений теплоизолирующего крепления применительно к конкретным условиям угольной шахты Аркагалинского месторождения исследованы динамика изменения и баланс составляющих удельной плотности теплового потока на контуре условной выработки, определена ее длина от поверхности до пункта, в котором и далее по ходу воздуха за счет повышения теплоаккумулирующей способности пород обеспечивается круглогодичное отрицательное значение температуры поверхности массива. Расчетное значение этой величины составило 211 м. Изменение во времени расходования греющего потенциала вентиляционного потока на испарение наполнителя ТКЗ и на преодоление термического сопротивления образующегося слоя теплоизоляции для средневзвешенного по длине этого участка выработки ее поперечного сечения, расположенного в 69 м от устья, представлена на рис.9. В реальных условиях растепление воздухоподающих выработок, сопровождающееся необходимостью преодоления повышенного аэродинамического сопротивления и проведения дополнительных работ по их перекреплению, наблюдается на длине до 1.9 км. Расчетная экономия электроэнергии для условий примера оценена в $1.2 \cdot 10^6$ кВт·ч.

В сопоставлении с эксплуатационными затратами энергии на преодоление аэродинамического сопротивления определен температурный диапазон и режим рациональной эксплуатации предложенной в главе 7 теплопередающей перегородки переменной геометрии, а также достигаемая при ее использовании экономия энергии.

Выполнен анализ работы предложенного в главе 7 термосифонного утилизатора низкопотенциальной тепловой энергии вентиляционных выбросов ПС. Теплообмен между потоками подаваемого и удаляемого воздуха интенсифицируется за счет одновременного осуществления его тремя путями: теплопередачей через перегородку, переносом паров наполнителя термосифонов и при периодическом аккумулировании части энергии исходящего потока в массиве. С использованием известного решения о количестве теплоты, выделяющейся за конечное время с единицы поверхности цилиндрической полости, определена зависимость периодичности взаимного изменения назначения каналов путем реверсирования потоков от располагаемого температурного напора. На рис.10 показано, что при пиковой энергопотребности небольшой шахты с дебитом вентиляции $20 \text{ м}^3/\text{с}$, составляющей 1360 кВт максимальные значения тепловой мощности, которая может быть сэкономлена упомянутыми путями, соответственно составляют 64.4, 109 и 74.4 кВт. Таким образом, общая экономия пиковых энергозатрат ($Q_{\text{вт}} = 248.5 \text{ кВт}$) составляет 18.3 %. В течение интервала времени года, когда необходим подогрев, сезонная экономия $Q_{\text{подогр}}$ энергозатрат ΣQ достигает 0.83 МВт-ч, что составляет 20.8 %.

Для лабораторного исследования изготовлен макет бесприводного регенеративного теплообменника. Определение его характеристик выполнено по рассмотренной в главе 1 известной методике с учетом фазовых превращений вещества наполнителя насадки. С этой целью использован известный прием введения эффективной теплоемкости

$$C_{\text{эф}} \cdot \Delta t = C_{\text{н}} \cdot \Delta t + r, \quad (34)$$

где $C_{\text{н}}$ и r - теплоемкость и удельная теплота парообразования наполнителя.

С использованием этой методики и соответствующего уравнения в числах подобия, описывающего внешний теплообмен, при конструировании лабораторного макета оценены массовая скорость перемещения рабочего тела и тепловая мощность.

Приводятся технико-экономические показатели разработанных внедренных и реализованных решений СНМ транспортных, гидротехнических и энергетических ПС, использующих естественные и техногенные энергоресурсы. Рассматриваются преимущества и перспективы реализации разработанных и переданных заинтересованным организациям энергосберегающих решений. Практические результаты обобщенно оценены в виде табл.2, составленной аналогично табл.1.

Таблица 2.

Годовая эффективность использования энергоресурсов систем нормализации микроклимата подземных сооружений

NN пп	Типы сооружений	Подтвержденная доку- ментами о внед- рении и использовании			Потенциальная при использовании ре- зультатов работы		
		КВт-ч	м³ ПС	Т.У.Т.	КВт-ч	м³ ПС	Т.У.Т.
1	Метрополитены	Экономия энергозатрат на вентиляцию, исклю- чение горных работ при замене вентиляторов					
		41·10 ⁶	60·10 ³	15000	27·10 ⁶	18·10 ³	11000
2	Транспортные тоннели	Снижение мощности вентиляционных систем, уменьшение объемов горных работ					
		9·10 ⁶	23·10 ³	3500	14·10 ⁶	42·10 ³	5800
3	Гидротехнические тоннели	Экономия энергозатрат на вентиляцию и охлаждение воздуха при проходке					
		38·10 ⁵	-	1400	11·10 ⁶	-	4000
4	Нагорные подземные комплексы	Снижение мощности вентиляционных и конди- ционирующих систем при проходке и эксплу- атации, уменьшение объемов горных работ					
		6·10 ⁶	9·10 ³	2300	20·10 ⁶	25·10 ³	7600
5	Угольные шахты Центрального района Донбасса	Снижение мощности вентиляционных и конди- ционирующих систем при проходке и эксплу- атации, уменьшение объемов горных работ					
		4·10 ⁶	-	1400	17·10 ⁶	36·10 ³	6400
6	Сооружения зоны сурового климата	Исключение работ по перекреплению и проходке воздухоподающих выработок, снижение энерго- затрат на подогрев наружного воздуха					
		-	-	-	8·10 ⁶	28·10 ³	7800
ИТОГО		64·10 ⁶	92·10 ³	23600	97·10 ⁶	311·10 ³	42600

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненного комплекса теоретических и экспери-
ментальных исследований особенностей протекания в ПС тепломассо-
обменных и аэродинамических процессов расширены известные и полу-
чены новые научные представления, нашедшие отражение в разрабо-
танных методиках прогноза и способах регулирования параметров

микроклимата. Предложены новые принципы создания энергосберегающих СНМ, разработаны и внедрены технические и технологические решения с рациональным использованием таких естественных и техногенных энергоресурсов, как изменчивость климатических условий, теплоаккумулирующая способность вмещающего горного массива и активной теплоизоляции, естественный аэростатический тепловой напор, фильтрация холодной воды, механическое и охлаждающее действие потока рабочей воды ГЭС, охлаждающее и осушающее действие сжатого воздуха, энергия сбросных вентиляционных потоков.

В работе получены следующие новые научные, методические и практические результаты :

1. Уточнено и упрощено применительно к условиям метрополитенов и тоннелей описание нестационарного теплообмена воздуха и массива при гармонических колебаниях температуры потока.

2. Впервые предложены методы определения движущих сил, объемов естественного проветривания и воздушораспределения в нагорных ПС, основанные на одновременном учете топологии, изменчивости внешних условий и нестационарности внутреннего теплообмена.

3. Для выработок с низкой относительной влажностью воздуха обоснован метод итерационного решения уравнений баланса теплоты и массы, предусматривающий расчетное определение интенсивности массообмена на основе уравнений в числах подобия.

4. Разработаны уточненные описания теплообмена в каналах, осложненного увлажнением стенок, периодическим переключением потоков, наличием термосифонов, активной теплоизоляции и роторных теплообменников с фазовыми превращениями насадки.

5. На основе результатов теоретических исследований применительно к типичным ситуациям разработаны новые и уточнены существующие методики прогноза термовлажностных параметров микроклимата и определения мощности технических средств его нормализации.

6. Обоснован принцип рационального использования теплоаккумулирующих свойств массива для регулирования вентиляции по тепловому фактору, разработан алгоритм автоматизированных систем управления вентиляцией Московского и Киевского метрополитенов.

7. Разработаны и внедрены способы нормализации микроклимата гидротехнических ПС с использованием действия напорной фильтрации и потока рабочей воды, а также комплексное техническое решение СНМ подземного комплекса Рогунской ГЭС;

8. Оценена эффективность применения сжатого воздуха для нормализации микроклимата в шахтах Донбасса, сопоставлены показатели

различных вариантов увеличения глубины действующих шахт;

9. Обоснован принцип и разработаны способы и средства активной сезонной теплоизоляции и тепловой защиты выработок;

10. Оценены возможность и рациональность утилизации низкопотенциальной тепловой энергии исходящих вентиляционных потоков путем организации их прямого теплообмена с подаваемым воздухом.

11. Определены энергетическая и экономическая эффективность, а также область рационального применения предложенных решений.

Результаты работы позволяют научно и методически обосновать определение технических и режимных параметров, проектирование и применение энергосберегающих СНМПС и их элементов. Подтвержденная документами годовая эффективность внедрения и использования результатов характеризуется экономией электроэнергии в размере $64 \cdot 10^6$ кВт·ч и исключением необходимости проведения $92 \cdot 10^3$ м³ объема горных работ, что эквивалентно экономии 23600 тонн условного топлива. Реально предполагаемое расширение объема использования результатов позволит получить дополнительную годовую экономию соответственно $97 \cdot 10^6$ кВт·ч, $311 \cdot 10^3$ м³ горных работ и 42600 т. у. т.

Основные публикации автора по теме диссертации.

Нормативные документы :

1. Единая методика прогнозирования температурных условий в угольных шахтах. - Макеевка: Изд. МакНИИ, 1979. - 196 с.

2. Руководство по проведению тепловых съемок в угольных шахтах. - Макеевка : Изд. МакНИИ, 1982. - 68 с.

3. Руководство по проектированию и осуществлению теплового режима при проходке туннелей и подземных выработок энергостроительства в условиях пониженных и повышенных температур. - М.: Орг-энергострой, 1984. - 128 с.

Статьи :

4. Зимин Л. Б., Малащенко Э. Н. О влиянии теплоуравняющей оболочки на вентиляционный режим туннелей метрополитена / Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов. Тез. докл. 2 науч.-техн. конф. - Кохтла-Ярве, 1979. - Таллин, БИТ, 1979. - С. 159-162.

5. Зимин Л. Б., Малащенко Э. Н., Черняк В. П. Обоснование режимов вентиляции сооружений метрополитена по тепловому фактору / Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов. Тез. докл. 2 науч.-техн. конф. - Кохтла-Ярве, 1979. - Таллин, БИТ, 1979. - С. 157-159.

6. Зимин Л. Б. Исследование процесса естественной вентиляции

транспортного тоннеля большой протяженности // Конвективный теплоперенос. - Киев: Наук. думка, 1982. - С. 123-127.

7. Зимин Л.Б. К расчету теплового кондиционирования тупиковых выработок // Промышленная теплотехника, N 2, 1982. - С. 106-108.

8. Зимин Л.Б. Оценка эффективности регулирования вентиляции метрополитенов // Промышленная теплотехника N 4, 1983. - С. 104-106.

9. Гриценко Т.Д., Зимин Л.Б., Черняк В.П. К расчету энтальпии влажного воздуха применительно к условиям горных выработок // Промышленная теплотехника N 5, 1983. - С. 47-49.

10. Зимин Л.Б. Влияние климатических факторов на проветривание тоннелей / Тр. Межд. Бюро по горной теплофизике. Вып. 3. - НРБ, Пловдив, 1983. - С. 48-49.

11. Зимин Л.Б., Малашенко Э.Н. Исследование и оптимизация теплового режима подземных сооружений метрополитена / Теплофизические процессы в горной технологии. Сб. науч. тр. - Л.: Изд. ЛГИ, 1983. - С. 49-52.

12. Зимин Л.Б. К расчету влагосодержания при местном охлаждении воздуха // Уголь Украины, N 2, 1984. - С. 33-34.

13. Зимин Л.Б., Качалина Л.П., Малашенко Э.Н., Резников М.А. Расчет теплового режима при проведении туннелей в сложных условиях // Энергетическое строительство, N 8, 1984. - С. 33-34.

14. Зимин Л.Б. Упрощенный способ теплового расчета горных выработок // Промышленная теплотехника, N 6, 1985. - С. 93-95.

15. Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П. Результаты расчетного анализа варианта теплоизолирующего крепления // Тепловые расчеты процессов и устройств в горном деле Севера. - Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1987. - С. 75-80.

16. Зимин Л.Б. Особенности оперативного теплового расчета выработок, проводимых с земной поверхности / Тр. Межд. Бюро по горной теплофизике. Вып. 5. - Индия, Нью-Дели, 1988. - С. 318 - 327.

17. Зимин Л.Б., Качалина Л.П., Резников М.А. Расчет и регулирование теплового режима при сооружении гидротехнических выработок в экстремальных климатических условиях. Обзорная информация. - М.: Информэнерго, 1989. - 48 с.

18. Зимин Л.Б., Золотаренко Д.П., Малашенко Э.Н. Нормализация теплового режима подземных ГЭС с использованием сжатого воздуха // Промышленная теплотехника, N 4, 1990. - С. 108-110.

19. Зимин Л.Б. Расчет тепломассообмена вентиляционной струи с влажной поверхностью выработок // Разработка месторождений полезных ископаемых. - Киев: Техника, 1990. - вып. N 86. - С. 43-46.

20. Зимин Л.Б., Черняк В.П. Принципы разработки термочувствительных средств тепловой защиты многолетнемерзлого горного массива // Промышленная теплотехника, N 5, 1990. - С. 17-21.

21. Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П. О сезонной теплоизоляции воздухоподающих горных выработок // Ресурсосберегающие технологии при подземной отработке полезных ископаемых Севера. - Якутск : ЯНЦ СО АН СССР, 1990. - С. 81-85.

22. Зимин Л.Б. Влияние места размещения пункта охлаждения на энергопотребление системы нормализации теплового режима подземной ГЭС // Энергетическое строительство, N 12, 1990. - С. 66-67. 351-357.

23. Зимин Л.Б., Золотаренко Ю.П., Малашенко Э.Н., Черняк В.П. Регулирование теплового режима при новых технологиях проходки / Тр. 24 Межд. конф. по безопасности работ в горной промышленности. - Донецк, окт. 1991. - м.: Внешторгиздат, N 19379эс, 1991. - Ч. 2. - С. 351-357.

24. Черняк В.П., Зимин Л.Б. Методические основы теплового расчета воздухоподающих выработок гидротехнических подземных сооружений // Физические процессы горного производства. - Л.: Изд. ЛГИ, 1992. - С. 114 - 119.

25. Добрянский Ю.П., Зимин Л.Б., Черняк В.П. Прогноз температуры и влажности воздуха в вентиляционном стволе подземной ГЭС // Промышленная теплотехника, N 1, 1993. - С. 98 - 102.

26. Зимин Л.Б. Манометрическая коррекция термосифонов в системах утилизации низкопотенциальной теплоты исходящих вентиляционных потоков // Промышленная теплотехника. - N 3, 1993. - С. 90 - 94.

27. Зимин Л.Б. Прогноз термовлажностных условий в тупиковой выработке при нормализации микроклимата с помощью вихревой трубы // Промышленная теплотехника. - N 2-3, 1994. - С. 114 - 120.

28. Добрянский Ю.П., Зимин Л.Б., Макаренко С.В. Нормализация температурно-влажностных условий в горных выработках с помощью сжатого воздуха // Промышленная теплотехника. - N 4-6, 1994. - С. 51 - 55.

29. Черняк В.П., Зимин Л.Б. Автоматическое управление вентиляцией подземных сооружений по тепловому фактору / Тр. 12 Межд. конф. по автоматизации горной пр-сти. - Польша, Гливице, 1995.

Изобретения :

30. А.с. СССР N 1286787. Устройство для ускорения свободного газового потока / Зимин Л.Б., Колодина Е.А., Малашенко Э.Н. - БИ N4, 1987.

31. А.с. СССР N 1196514 Способ теплоизолирующего крепления горных выработок в условиях вечной мерзлоты / Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П. - БИ N 45, 1985.

32. А.с. СССР N 1282618 Способ теплоизолирующего крепления

воздухоподающих горных выработок в условиях вечной мерзлоты / Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П. - БИ N 38, 1990.

33. А.с. СССР N 1473422 Теплоизолирующая крепь горных выработок в условиях вечной мерзлоты и способ ее возведения/Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П. - БИ N 14, 1989.

34. А.с. СССР N 1208254 Теплорегулируемая арочная крепь / Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П. - БИ N 4, 1986.

35. А.с. СССР N 1548448 Способ бетонирования горных выработок в вечномерзлых породах и теплоизолирующая опалубка для его осуществления / Зимин Л.Б. - БИ N 9, 1990.

36. А.с. СССР N 1578363 Шахтный теплоизолирующий экран / Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П., Коновалов К.Н. - БИ N 26, 1990.

37. А.с. СССР N 1677335 Шахтный теплоаккумулирующий экран / Зимин Л.Б., Малашенко Э.Н., Мороз В.Ф., Черняк В.П. - БИ N 34, 1991.

38. А.с. СССР N 1606711 Способ проветривания помещений нагорных подземных ГЭС / Башмаков В.М., Гройсман В.О., Зимин Л.Б., Малашенко Э.Н., Свюра В.Н., Тарабукин Г.Е., Черняк В.П. - БИ N 42, 1990.

39. А.с. СССР N 1696727 Устройство для регулирования теплового режима подземных ГЭС / Гройсман В.О., Зимин Л.Б., Малашенко Э.Н., Черняк В.П., Шапиро И.М. - БИ N 45, 1991.

40. А.с. СССР N 1633138 Способ регулирования теплового режима подземных ГЭС / Гройсман В.О., Зимин Л.Б., Малашенко Э.Н., Черняк В.П. - БИ N 9, 1991.

41. А.с. СССР N 1726751 Устройство для утилизации тепловой энергии исходящей струи шахтного воздуха / Зимин Л.Б., Черняк В.П. - БИ N 14, 1992.

42. А.с. СССР N 1657876 Регенеративный противоточный теплообменник / Зимин Л.Б., Черняк В.П. - БИ N 23, 1991.

43. А.с. СССР N 1686182 Регенеративный теплообменник / Зимин Л.Б., Золотаренко Ю.П., Коновалов К.Н., Мороз В.Ф., Черняк В.П. - БИ N 39, 1991.

44. А.с. СССР N 1647569 Ротор регенератора / Зимин Л.Б. - БИ N 16, 1991.

45. А.с. СССР N 1710943 Ротор регенератора / Зимин Л.Б. - БИ N 5, 1992.

46. Положительное решение от 15.04.92 о признании изобретением заявки N 4933735/06 "Тепловой привод". - Зимин Л.Б.

47. Патент Украины N 5, 1992 "Способ утилизации низкопотенциальной тепловой энергии и устройство для его реализации" - Зимин Л.Б., Золотаренко Ю.П., Малашенко Э.Н., Черняк В.П.

48. Патент Российской Федерации N 2013560, 1994 "Устройство для оптимизации проветривания подземных сооружений" - Зимин Л.Б., Мороз В.Ф., Черняк В.П.

АННОТАЦИЯ

Zimin L.B. Using of Natural and Technogenic Power Resources in Systems pertaining to normalising microclimate conditions within the underground objects. The thesis is submitted for Doctor's degree in Engineering (specialization 05.14.04 - Industrial Heat Power Engineering) National Acad. Sciences of Ukraine, Kiev, 1995.

The thesis contains results of theoretical and experimental investigations of heat and mass transfer processes within underground objects of different applications under ventilation and adjusting of temperature and moisture parameters. The possibility of using new factors for sake of power saving having natural and technogenous origin, which occur while using untraditional conditions of placing and functioning of underground objects is shown. In accordance with these conditions methods of calculated prognoses of temperature and moisture parameters of microclimate and determining installation's power for its normalising are developed. There are being suggested methods and means for controlling heat and ventilation conditions and their introduction into industrial application is achieved. In regard to the thesis, 43 articles have been published by the author, 30 inventor's certificate and patents granted.

Зимин Л.Б. Использование естественных и техногенных энергоресурсов в системах нормализации микроклимата подземных сооружений. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (специальность 05.04.14 - Промышленная теплоэнергетика) Национальная Академия наук Украины, Киев, 1995. В работе содержатся результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена, происходящих в подземных сооружениях различного назначения при проветривании и регулировании температурно-влажностного режима. Показана возможность использования в целях энергосбережения новых факторов естественного и техногенного происхождения, возникающих при нетрадиционных условиях размещения и функционирования подземных сооружений. Применительно к этим условиям разработаны методы расчетного прогноза температурно-влажностных параметров микроклимата и определения мощности установок для его нормализации. Предложены и внедрены способы и технические средства управления тепловым и вентиляционным режимом. По теме диссертации автором опубликованы 43 печатных работы, получено 30 авторских свидетельств и патентов.

Ключові слова: енергоресурсозбереження, підземі споруди, тепломасообмін, мікроклімат, регулювання.

Подписано к печати 27.09.1995г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная Усл.-печ.лист.20 Уч.-изд.лист 2,0.
Тираж 100. Заказ 389.

Полиграф. уч-к Института электродинамики АН Украины,
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

44646

