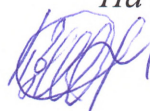


Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Подвигин Константин Александрович

**НОРМАЛИЗАЦИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ
ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ
ТРУДА ГОРНОРАБОЧИХ**

Специальность 05.26.01 – Охрана труда (по отраслям)
(технические науки)

Диссертация

на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Научный руководитель:
канд. техн. наук, доцент,
Кавера А.Л.

Идентичность всех экземпляров диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:
Ученый секретарь диссертационного совета Д 01. 008. 01

д-р техн. наук, доцент

И.А. Бершадский



Донецк – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
РАЗДЕЛ 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА ГОРНОРАБОЧИХ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПО ТЕПЛОВОМУ ФАКТОРУ, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	13
1.1 Анализ тепловой обстановки и выполнение температурного режима на рабочих местах в горных выработках.....	13
1.2 Анализ влияния повышенной температуры воздуха рабочей зоны на организм горнорабочих.....	29
1.3 Анализ существующих средств и способов нормализации температурного режима в рабочей зоне горной выработки.....	44
Цель и задачи исследований.....	52
РАЗДЕЛ 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА ЛЬДОСОЛЯНОЙ СМЕСЬЮ ...	54
2.1 Исследование теплопоглощения льдосоляной смесью при охлаждении воздуха.....	54
2.2 Разработка математической модели теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода в процессе охлаждения воздуха.....	60
2.3 Исследования процессов теплообмена воздушного потока с аккумуляторами холода в теплообменных камерах установки.....	65
2.4 Исследования подачи охлажденной воздушной струи в проветриваемую горную выработку для образования локальной рабочей зоны с нормативной температурой воздуха.....	69
Выводы к разделу.....	83
РАЗДЕЛ 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В НЕЙ.....	85
3.1 Разработка плана многофакторного эксперимента при исследовании охлаждения воздуха аккумуляторами холода в горной выработке.....	85

3.2 Обоснование основных параметров экспериментальной установки для охлаждения воздуха и методики проведения лабораторных испытаний	95
3.3 Проведение натурных испытаний для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	107
3.4 Обоснование размеров локальной рабочей зоны с нормативными параметрами температуры воздуха и время ее существования	117
Выводы к разделу.....	126
РАЗДЕЛ 4 ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ.....	127
4.1 Методика расчета параметров установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	127
4.2 Разработка тактики и обоснование возможной области применения установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки .	129
4.3 Расчет годового экономического эффекта от внедрения установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	135
4.4 Требования безопасности при применении установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	141
Выводы к разделу.....	146
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	147
ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ	149
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	150
Приложение А Копия технических требований к установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	158
Приложение Б Копия акта опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок	175
Приложение В Копия технического задания на установку локального охлаждения воздуха в рабочей зоне горных выработок глубоких шахт.....	191
Приложение Г Копия справки использования и внедрения результатов диссертационной работы в НИР ГОУВПО «ДОННТУ».....	210

Приложение Д Копия справки внедрения результатов диссертационных исследований в учебный процесс ГОУВПО «ДОННТУ».....	211
Приложение Е Копия акта внедрения результатов диссертационного исследования в ОГВГСО	212
Приложение Ж Копия методических рекомендаций по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки.....	213
Приложение З Копия патента на полезную модель	253

ВВЕДЕНИЕ

Состояние и актуальность работы. В настоящее время в Донецком угольном бассейне горные работы ведутся на глубинах 700...1400 м, где температура горных пород достигает 318 К, вместе с тем, в ходе выполнения работ применяются высокоэнергетические силовые агрегаты, создающие значительные техногенные тепловые потоки. Кроме того, на тепловой режим шахт оказывает значительное влияние транспортируемая горная масса, шахтная вода и теплопритоки из выработанного пространства. Таким образом, на сегодняшний день температура воздуха в горных выработках достигает 301...308 К, что значительно выше допустимых значений (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более 299 К). С целью соблюдения требований охраны труда, для нормализации температурного режима, горнодобывающие предприятия применяют: различные способы и технические средства охлаждения рудничного воздуха; системы кондиционирования; увеличение расхода воздуха на рабочих местах; сокращение путей подачи свежей струи воздуха; осушение горных выработок и т.д.

Однако, в сложившихся горно-геологических, горнотехнических и производственно-эксплуатационных условиях из-за сложной шахтной вентиляционной сети, большой протяженности воздухоподающих выработок, их значительной обводненности применяемые способы и средства охлаждения рудничного воздуха, а также системы кондиционирования не позволяют в полной мере нормализовать температурный режим в рабочей зоне до безопасных значений. Область применения системы кондиционирования охватывает протяженные горные выработки (очистные забои, подготовительные горные выработки и т.д.), и являются дорогостоящими и энергоемкими, вследствие чего, приводят к значительному росту себестоимости добываемого угля. Перечисленные недостатки практически свели к минимуму применение подобных систем и установок в угольной промышленности Донбасса.

В то же время, во время ведения аварийно-восстановительных и ремонтных работ возникает потребность снижения температуры рудничного воздуха в локальных рабочих зонах до величины допустимой ПБ в угольных шахтах. В ходе выполнении таких работ, как правило, искусственное охлаждение воздуха практически не применяется, вследствие чего на рабочих местах формируются крайне неблагоприятные условия для возможности терморегуляции организма, что приводит к тепловому истощению, перегреву тела и тепловому удару. У человека, перенесшего тепловой удар, прекращается потоотделение, кожа становится сухой и горячей, температура тела повышается до 315 К и выше, сердцебиение значительно учащается (до 150-160 уд/мин). Смерть обычно наступает в течение нескольких часов. Ведение учета травматизма полученных при выполнении работ в горных выработках с нагревающим микроклиматом, не включают такой вид травмы как тепловой удар, а указывается как сердечнососудистая недостаточность. Согласно данным опубликованных в работах Р.А. Тишина за период с 2003 по 2013 гг. в угольной промышленности произошло 1810 несчастных случаев со смертельным исходом, из которых 14.3% по причине острой сердечной недостаточности.

Согласно действующим нормативно-правовым актам на рабочих местах, при температуре воздуха 305 К и выше, должны применяться различные технические средства, позволяющие нормализовать температурный режим. Однако эти ограничения не распространяются на специальные работы, выполняемые в чрезвычайных ситуациях, при устранении опасностей для жизни или здоровья горнорабочих и устранении последствий аварий.

В связи с этим, работа по решению задач, посвященных исследованию и обоснованию возможности использования эффективных и безопасных источников холода, созданию технических средств для оперативного снижения температуры воздуха в локальной рабочей зоне, обеспечивающих безопасную работу горнорабочих в сложных условиях, является актуальной и направлена на повышение уровня охраны труда в горной промышленности.

Связь работы с научными программами, планами, темами. В диссертационную работу вошли результаты комплекса исследований в области нормализации микроклимата рабочей зоны, выполненных в ГОУВПО «ДОННТУ» при непосредственном участии автора. Комплекс исследований выполнен согласно тематическому плану научно-исследовательской работы ГОУВПО «ДОННТУ» Н-2019-4 от 01.01.2019 г. «Анализ и совершенствование мероприятий по основным видам аварийной опасности шахт ДНР».

В основу решения актуальной научно-технической задачи положена **идея**, заключающаяся в использовании особенностей хладагента на основе льдосоляной смеси, в условиях фазовых переходов льда при взаимодействии с движущейся струей воздуха, которые позволяют охлаждать воздушный поток до безопасной температуры в локальной рабочей зоне за счет эндотермических реакций гидратации соли в воде.

В соответствии с предложенной идеей работы сформулирована **цель работы** – нормализация температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки, путем охлаждения воздуха до температуры $t \leq 299$ К для создания безопасных условий труда горнорабочих.

Для достижения поставленной цели в работе сформулированы и решены следующие основные **задачи**:

1. Выполнить анализ существующих способов и технических средств регулирования теплового режима в горных выработках и установить возможные направления совершенствования технических решений по охлаждению воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.

2. Выполнить прогноз дальности подачи струи охлажденного воздуха в проветриваемую горную выработку, где обеспечивается температура воздуха $t \leq 299$ К, установить закономерности ее движения, а также исследовать процесс теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода.

3. Обосновать конструктивные и эксплуатационные параметры установки охлаждения воздуха, использующей хладагент на основе льдосоляной смеси.

Объектом исследования являются тепловые процессы в теплообменной камере установки при взаимодействии воздушного потока с аккумуляторами холода, с учетом влияния содержания соли в хладагенте на время охлаждения и температуру воздуха в зависимости от массы льдосоляной смеси, расхода воздуха через установку и начальной температуры льда и воздуха для нормализации температурного режима в рабочей зоне горной выработки.

Предметом исследования является обоснование безопасных параметров охлажденного воздушного потока для нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки, в условиях сложной по тепловому фактору техногенной обстановки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Зависимость скорости фазового перехода льдосоляной смеси от ее массы, времени плавления, массовой доли соли NaCl в смеси и начальной температуры охлаждаемого воздуха, которая позволяет обосновать параметры охлаждения воздуха для нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки.

2. Зависимость температуры воздуха в охлаждаемой зоне горной выработки от начальной температуры и скорости охлажденной струи воздуха, скорости и температуры спутного воздушного потока, которая позволяет определить размеры рабочей зоны с нормативной температурой $T \leq 299 \text{ K}$.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые установлена экспоненциальная зависимость скорости фазового перехода льдосоляной смеси при охлаждении воздушного потока в пределах его начальных температур 303-305 K, скорости в теплообменных камерах установки от 2 до 4 м/с и массовых долей соли NaCl в смеси, равных 0,2-0,23.

2. Впервые установлены аналитические зависимости, позволяющие определить изменение площади поперечного сечения охлажденной воздушной струи, ее дальности и температуры при удалении от установки, от соотношений: диаметра воздухоподающего трубопровода и начальной скорости охлажденной струи воздуха, начальных температур охлажденной и

вентиляционной струи. Это позволило подтвердить адекватность разработанных математических моделей, обосновать параметры установки и область ее применения.

Теоретическое значение полученных результатов состоит в развитии теоретических основ теплообменных процессов охлаждения движущегося потока воздуха льдосоляной смесью при протекании эндотермических реакций гидратации соли в воде, что позволило обосновать параметры аккумуляторов холода в теплообменных камерах установки, обеспечивающей нормализацию температуры воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки для повышения безопасности труда шахтеров.

Практическое значение полученных результатов:

1. Установлены оптимальные соотношения льда и соли, их рабочей температуры и температуры воздуха на выходе из установки а также время эффективного теплопоглощения в зависимости от скорости воздуха в установке, его температуры и массы льдосоляной смеси, что позволило разработать и научно обосновать технические требования к аккумуляторам холода на базе льдосоляной смеси и установке для их применения.

2. Обоснованы оптимальные параметры способа охлаждения рудничного воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки при ведении ремонтных и аварийно-восстановительных работ, а также аккумуляторов холода для установки его осуществления;

3. Разработаны технические требования к установке охлаждения воздуха, методические рекомендации по расчету ее параметров и параметров охлаждаемой рабочей зоны горной выработки. Установка может быть применена при выполнении аварийно-восстановительных и ремонтных работ в локальных рабочих зонах горных выработок.

Методы исследования. Для достижения цели и решения поставленных задач были использованы следующие методы исследования: анализ и обобщение данных научно-технической информации – при оценке перспективных способов и технических средств нормализации температурного режима локальных рабочих

зон горных выработок; математическое моделирование – при описании процессов переноса тепла в охлаждаемой зоне горной выработки; аналитические и численные методы определения параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки; физические методы – для изучения теплообмена, на базе которых разработана установка охлаждения воздуха; экспериментальные исследования в лабораторных условиях и шахтные испытания экспериментального образца установки охлаждения воздуха, определение ее технических характеристик с применением стандартной измерительной аппаратуры; статистическая обработка данных экспериментов с использованием компьютерной техники.

Реализация работы. Результаты работы вошли в «Технические требования к установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки», разработанные на кафедре «Охрана труда и аэрология» ГОУВПО «ДОННТУ» (Приложение А).

Экспериментальная установка для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки прошла опытно-промышленные испытания в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР (Приложение Б).

Результаты работы вошли в «Техническое задание на установку для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», разработанное в ГОУВПО «ДОННТУ» и согласованное с ведущими организациями по безопасности работ в горной промышленности: «МАКНИИ»; НИИГД «РЕСПИРАТОР» (Приложение В).

Результаты работы вошли в плановую научно - исследовательскую работу ГОУВПО «ДОННТУ» Н-2019-4 от 01.01.2019 г. «Анализ и совершенствование мероприятий по основным видам аварийной опасности шахт ДНР» (01.01.2019 - 31.01.2021 г.) (Приложение Г).

Результаты работы используются в учебном процессе ГОУВПО «ДОННТУ» для подготовки специалистов по специальности 21.05.04 «Горное дело» (Приложение Д).

Результаты работы приняты к рассмотрению ОГВГСО г. Донецк МЧС ДНР (Приложение Е).

Результаты работы вошли в «Методические рекомендации по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», разработанные в ГОУВПО «ДОННТУ» и согласованные с НИИГД «РЕСПИРАТОР» (Приложение Ж).

Степень достоверности и апробации результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается методологической базой исследований основанной на фундаментальных положениях термодинамики и математического моделирования, проверкой адекватности построенных моделей. Сравнение данных теории и эксперимента показали высокую сходимость результатов: среднеквадратическая ошибка расчетных данных не превышает 20% при расчете температуры воздуха на выходе из установки и при удалении от нее по ходу движения охлажденной струи воздуха. Применением современных методов решения задач с помощью компьютерной техники, проведением экспериментальных исследований с использованием разработанной методики.

Личный вклад соискателя. Сформулирована цель и задачи исследования; проведен обзор способов и технических средств охлаждения воздуха в горных выработках; выполнены экспериментальные исследования в лабораторных условиях и шахтные испытания экспериментального образца установки для охлаждения воздуха и проведен статистический анализ полученных результатов с помощью компьютерной техники; разработана математическая модель процессов взаимодействия охлажденной воздушной струи с воздухом спутного потока в горной выработке.

Апробация результатов диссертации. Основные положения работы представлены на международных научно-практических конференциях: международный научный форум ДНР «Инновационные перспективы Донбасса 2019», (г. Донецк); научно-техническая конференция ГОУВПО «ДОННТУ» «Донбасс будущего глазами молодых ученых 2019», (г. Донецк); XII

Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ 2020» (г. Кемерово); международный научный форум ДНР «Инновационные перспективы Донбасса 2020», (г. Донецк); международный научный форум ДНР «Инновационные перспективы Донбасса 2021», (г. Донецк); II международный форум студентов, аспирантов и молодых ученых-горнорабочих, посвященный 100-летию ГОУВПО «ДОННТУ», «Проблемы горного дела 2021» (г. Донецк).

Публикации. Основное содержание диссертационной работы опубликовано в 15 научных трудах, в том числе: 5 статей опубликовано в рецензируемых изданиях ВАК Минобрнауки ДНР; 2 статьи – в других изданиях; 8 статей – в сборниках международных научных конференций, 10 научных работ написаны без соавторства; 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, общих выводов, перечня принятых условных сокращений, изложена на 261 страницах машинописного текста, в том числе 157 страниц основной части, содержит 30 рисунков, 21 таблицу, список использованных источников из 63 наименований на 8 страницах и 8 приложений на 104 страницах.

Автор выражает искреннюю благодарность первому научному руководителю доктору технических наук, профессору Ю.Ф. Булгакову, доктору технических наук, профессору С.А. Калякину и кандидату технических наук Е.В. Курбацкому за ценные советы в процессе выполнения диссертации.

РАЗДЕЛ 1

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА
ГОРНОРАБОЧИХ В ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ ПО ТЕПЛОВОМУ ФАКТОРУ,
ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ тепловой обстановки и выполнение температурного режима на рабочих местах в горных выработках

Уголь – стратегический энергоноситель, ключевое сырье для химической промышленности и черной металлургии, один из основных видов топлива для населения и коммунальных потребителей, а, следовательно, гарант энергетической и экономической независимости государства.

В настоящее время развитие горнодобывающей промышленности в Донбассе угольном бассейне осуществляется за счет разработки запасов угля на больших глубинах (до 1500 м), увеличения энергоемкости машин и механизмов, а также протяженности выемочных полей 1000м и более.

Анализ тенденции развития горнопромышленных предприятий показывает, что одним из основных природных факторов, усложняющих работу шахт, является повышение температуры горного массива, что определяет тепловой режим выработок и рабочих мест. Известно, что температура горных пород на заданной глубине остается постоянной во времени при отсутствии поверхности теплообмена. В процессе ведения горных работ, происходит теплообмен между стенками горных выработок и воздухом, поступающим в шахту, температура которого значительно ниже от температуры окружающих пород.

Таким образом тепловой режим горных выработок глубоких шахт формируется под влиянием сложных процессов тепло- и массообмена между горным массивом и вентиляционной струей при воздействии целого ряда дополнительных факторов.

Основными источниками теплоприращения воздуха в выработках являются горный массив, работающее выемочное, проходческое, транспортное,

вспомогательное оборудование с электроприводом, транспортируемое ископаемое, в обводненных выработках - шахтная вода. В тепловом балансе лав и выемочных участков существенную долю составляют теплопритоки из выработанного пространства.

Широкий диапазон горно-геологических и горнотехнических условий отработки запасов угля на шахтах предопределяет применение большого числа технологических схем и параметров разработки пластов.

На основании выполненных исследований установлено, что степень проявления теплового фактора в выработках выемочных участков глубоких шахт во многом определяется комплексом технологических решений отработки пластов, и прежде всего системой разработки, схемой и параметрами проветривания, способом управления горным давлением, местом размещения основного участкового электрооборудования, рядом других параметров (длина выемочного поля, длина лавы и др.). Оптимизация указанных горнотехнических решений по тепловому фактору в конкретных условиях разработки угольных пластов, обоснование эффективных способов и средств регулирования теплового режима, в том числе и искусственного охлаждения воздуха, возможны только на основе выполнения трудоемких вариантных тепловых расчетов горных выработок.

Освоение глубоких горизонтов действующими шахтами сопровождается изменением горно-геологических и гидрогеологических условий: возрастает температура горного массива, наблюдается закономерное изменение физико-механических свойств горных пород, понижаются фильтрационные свойства горного массива, уменьшается водопроницаемость и пористость песчаников и известняков. Все эти особенности в значительной мере влияют на формирование тепловых условий в горных выработках. С уменьшением водообильности горных пород наблюдается закономерное снижение роста влагосодержания воздуха при движении его по горным выработкам, что положительно влияет на формирование шахтного климата [1].

Действующие глубокие шахты Донбасса, принятые в эксплуатацию в

70-80-е годы прошлого столетия, характеризуются значительными размерами шахтных полей по простиранию и падению. Большие размеры шахтных полей по простиранию вызывают необходимость в секционной раскройке шахтного поля на отдельные вентиляционные блоки. При значительных размерах по падению в процессе эксплуатации шахты возникает необходимость в подготовке новых горизонтов путем углубки главных стволов. Это приводит к образованию весьма протяженной и разветвленной сети подземных горных выработок, необходимости проведения большого количества тупиковых выработок большой протяженности, неравномерности развития горных работ во времени, способствует формированию неблагоприятного шахтного климата и создает существенные трудности при выполнении работ по кондиционированию рудничного воздуха.

Основным направлением развития очистной выемки является расширение объемов применения механизированных комплексов, являющихся определяющим фактором повышения безопасности работ и производительности труда по добыче угля.

Применение механизированных комплексов обеспечивает возможность повышения нагрузок на очистные забои и увеличения скорости их подвигания. В связи с этим уменьшается продолжительность теплообмена горного массива с рудничным воздухом, повышается теплоотдача к вентиляционной струе. Весьма важным является то обстоятельство, что по мере роста скорости подвигания лавы увеличивается приток тепла из зоны выработанного пространства при управлении кровлей полным обрушением. При этом увеличивается также теплоотдача отбитого и транспортируемого в лаве угля. Повышение нагрузок на очистные забои связано с увеличением мощности эксплуатируемого электрооборудования и выделяемого им тепла [2].

Проветривание тупиковых выработок (вертикальных, горизонтальных, наклонных) осуществляется преимущественно нагнетательным способом местными вентиляторными установками. Поддержание нормального проветривания длинных тупиковых выработок за счет установки для этой цели спаренных вентиляторов приводит к дополнительному нагреву подаваемого в

выработку воздуха.

С эксплуатационной точки зрения наиболее прогрессивными являются технические решения, предусматривающие выемку угля столбами по восстанию или простиранию длиной до 1500-2000 м. Это вызывает необходимость проведения тупиковых выработок большой протяженности, сопровождающегося формированием весьма неблагоприятных климатических условий, как в призабойных рабочих зонах, так и по длине выработок.

Основным направлением технического перевооружения горно-подготовительных работ является дальнейшее расширение проведения выработок проходческими комбайнами и комплексами, что обеспечивает более высокие скорости проходки, чем при буровзрывном способе. Максимальное совмещение процессов проходческого цикла при скоростном проведении выработок обеспечивает повышение продолжительности рабочего времени комбайна по разрушению горного массива, что сопровождается интенсивным выделением тепла в призабойное пространство выработки.

В условиях тупиковых выработок с небольшим расходом вентиляционного воздуха повышение мощности горнопроходческого оборудования существенно влияет на формирование их теплового режима.

С точки зрения тепловых условий, перечисленные факторы (образование весьма протяженной и разветвленной сети горных выработок, повышение нагрузок на очистные забои, скоростные темпы проходки выработок, повышение энерговооруженности выемочных участков и подготовительных выработок) уменьшают верхний предел глубины горных работ без применения средств искусственного регулирования теплового режима в горных выработках.

Тепловой режим горных выработок глубоких шахт формируется под влиянием ряда происходящих процессов, к основным из которых относятся: сжатие вентиляционной струи под давлением столба воздуха в стволах и наклонных выработках, тепло- и массообмен рудничного воздуха с горным массивом и транспортируемым ископаемым, тепловыделение при работе машин и механизмов, теплоотдача трубопроводов сжатого воздуха, тепло- и влагообмен с

шахтной водой и другие менее значимые процессы.

Изменение тепловых параметров воздуха, вызванное влиянием каждого из факторов и процессов, следует рассматривать во взаимосвязи их между собой.

Воздух, поступающий в подземные горные выработки, нагревается при сжатии и расширении в вертикальных и наклонных выработках. При движении вниз по стволу и наклонным горным выработкам воздух сжимается под действием силы собственного веса. Произведенная при сжатии работа затрачивается на увеличение внутренней энергии и сопровождается повышением его температуры. Понижение давления (движение воздуха вверх по стволу и наклонной выработке) сопровождается снижением внутренней его энергии и уменьшением температуры [3].

Если допустить, что воздухоподающий ствол сухой, а теплообмен между стенками ствола и воздухом не происходит, процесс в стволе можно рассматривать как адиабатический, при котором тепло не прибывает и не убывает.

Изменение потенциальной энергии воздуха (Q_c , Вт/с) при перемещении его по негоризонтальному каналу с разностью отметок по высоте ($H_2 - H_1$) определяется по известной формуле [4]

$$Q_c = 9,81G(H_2 - H_1), \quad (1.1)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/с;

H_1, H_2 – отметки выработки по глубине, м.

Вычисленное по формуле (1.1) значение потенциальной энергии идет на изменение энтальпии воздуха.

Повышение температуры воздуха в стволе при адиабатическом сжатии составляет

$$\Delta t_{-c} = \frac{g \cdot G \cdot (H_2 - H_1)}{G \cdot C} = \frac{g \cdot (H_2 - H_1)}{C}, \quad (1.2)$$

где C – теплоемкость воздуха ($C = 1000$ Дж/(кг · К)).

Температура воздуха при сжатии во время движения вниз по вертикальному стволу повышается примерно на 0,01К на каждый метр увеличения глубины или на 1 К на 100 м глубины. Точно так же при движении воздуха вверх температура его понижается на ту же величину.

Приведенные величины справедливы только для абсолютно сухого воздуха. Для влажного воздуха, которым является как атмосферный, так и рудничный воздух, повышение или понижение температуры вследствие сжатия или расширения меньше. Кроме того, в реальных условиях в стволах происходят более сложные процессы. По мере движения по стволу влажность и теплосодержание воздуха изменяются, поэтому действительное изменение температуры воздуха с глубиной ствола значительно отличается от теоретических выводов.

Во-первых, вместе со сжатием вентиляционной струи происходит теплообмен между воздухом и горными породами, окружающими ствол, температура которых с возрастанием глубины увеличивается. Кроме того, летом температура воздуха на поверхности в большинстве случаев выше, чем температура пород, особенно в верхней части ствола. В этом случае свежая струя воздуха в стволе несколько охлаждается. Зимой происходит обратное явление. Ввиду сравнительно низкой теплопроводности горных пород вокруг ствола образуется, так называемая, теплоуравнивающая оболочка. Действие теплоуравнивающей оболочки распространяется обычно на выработки околоствольного двора, капитальные воздухоподающие выработки и, в меньшей мере, на участковые воздухоподающие выработки [1 с.41].

Во-вторых, на температуру свежего воздуха существенное влияние оказывает влажностное состояние стенок ствола и капез воды. Как правило, поступающий вниз по стволу воздух увлажняется, в результате этого происходит повышение его абсолютной влажности и связанное с этим снижение температуры.

Таким образом, на пути от устья ствола до околоствольного двора

температура воздуха изменяется, претерпевая колебания в зависимости от температуры и влажности воздуха на поверхности, влажностного состояния ствола, глубины, на которую опускается воздух, а также от температуры окружающих горных пород.

В результате отдачи тепла стенкам ствола и поглощения влаги температура воздуха в воздухоподающих стволах снижается в теплые периоды года (летом) и повышается при низких значениях поступающего в стволы воздуха. В стволах, где наблюдается интенсивный капеж воды, в летний период года происходит существенное снижение температуры воздуха и увеличение его относительной влажности. В холодные периоды года наличие капежа в стволе тормозит приrost его температуры.

Тепловыделение горного массива является основным фактором, определяющим температуру воздуха в выработках глубоких шахт. Движущей силой, вызывающей возникновение процессов переноса тепла в горных выработках и определяющей направление и интенсивность процесса теплообмена, является разность температур между горным массивом и вентиляционной струей.

Для прогноза тепловых условий в горных выработках необходимо располагать данными о геотермических показателях месторождения, геотермического района или конкретного шахтного поля, которые характеризуются геотермической ступенью или геотермическим градиентом.

Геотермическая ступень выражает разницу глубин залегания горного массива, температура на которых отличается на 1 К для данного геотермического района или конкретного шахтного поля. Геотермическая ступень имеет размерность м/К.

Геотермический градиент является величиной, обратной геотермической ступени и представляет собой численное значение повышения температуры горных пород в градусах при увеличении глубины залегания на один метр, имеет размерность К/м.

Систематизированные исследования геотермии горнопромышленных

районов Донбасса показали, что температура горных пород с глубиной возрастает по закону, весьма близкому к линейному. Отклонения от линейной зависимости объясняются тепловыми аномалиями, вызванными местными источниками тепла и различием теплопроводности литологических разностей толщи горных пород. Наряду с местными тепловыми аномалиями, приуроченными к пластам угля, наблюдаются также аномальные проявления, вызванные воздействием водоносных горизонтов.

Прогнозируемая температура горных пород на глубине заложения выработки t_n определяется по известной формуле [4 с.52]

$$t_n = t_{kn} + \frac{H}{\Gamma_{cm}}, \quad (1.3)$$

где t_{kn} – средняя температура поверхности земли для геотермического района или шахтного поля, К;

H – глубина, для которой определяется температура горных пород, К;

Γ_{cm} – геотермическая ступень для данного геотермического района или шахтного поля, м /К.

Значения геотермической ступени могут изменяться, как в пределах горнопромышленного района, так и в пределах одного шахтного поля. В целом, для горнопромышленных районов Донбасса, значения геотермической ступени колеблются в пределах 31,2-62,3 м/К. Более благоприятными в геотермическом отношении являются восточные районы Донбасса, где значения геотермической ступени составляют 53,9-62,3 м/К. В среднеднепровском районе эти значения снижаются до 31,2-32,8 м/К [5].

Закономерность, определяющая тип изменения геотермической ступени с глубиной, не установлена. Надежные геотермические значения для каждой области можно определить только путем прямых измерений температуры горных пород. Чем глубже температура породы измеряется от поверхности, тем надежнее определяется значение геотермической ступени (таблица 1.1.).

Таблица 1.1.

Среднее значение температуры земной поверхности и величины геотермической ступени для геотермических участков Донбасса

Номер геотермического участка	$T_{зп}, K$	$\Gamma_{ср}, м/с$	Номер геотермического участка	$T_{зп}, K$	$\Gamma_{ср}, м/с$
Красноармейский район			Центральный район		
1	282,0	35,6	1	285,1	33,7
2	283,2	34,2	2	284,4	44,0
3	283,1	33,9	3	283,0	42,8
4	283,1	34,7	4	283,7	47,1
5	283,5	36,5	5	282,7	48,4
6	283,5	34,1	6	282,1	42,7
Донецко - Макеевский район			Лисичанский район		
1	282,9	39,7	1	284,8	38,3
2	281,3	31,2	2	283,4	37,8
3	282,2	35,9	Краснодонский район		
4	282,5	32,8	1	285,7	52,3
5	282,0	42,2	2	284,9	44,9
6	281,2	34,5	3	284,7	47,9
7	283,1	33,1	4	284,5	47,5
8	281,6	34,1	5	284,9	53,9
9	283,0	40,6	6	284,2	53,8
10	283,3	36,3	Гуково – Зверевский район		
11	282,8	37,6	1	284,6	52,6
12	283,9	38,6	2	283,0	43,0
Чистяково – Снежнянский район			3	282,2	40,1
1	282,7	41,4	4	282,5	40,6
2	282,2	39,8	–	–	–
3	282,0	44,1	–	–	–

Процесс теплообмена между воздухом и горным массивом в горных выработках происходит, в основном, за счет конвективного теплообмена и частично - излучения.

Тепловой поток ($Q, Вт/м^2$), поступающий от окружающих выработку горных пород в воздух, движущийся по горизонтальной горной выработке, в общем виде может быть выражен известной формулой [4 с.28]

$$Q = K_{\tau} \cdot F \cdot (t_n - t_B), \quad (1.4)$$

где K_r – коэффициент нестационарного теплообмена между горным массивом и воздухом, Вт/(м² · К);

F – площадь поверхности стенок проветриваемой выработки, м²;

t_n – естественная температура горного массива, определенная по глубине расположения выработки, К;

t_B – средняя температуры воздуха по длине выработки, К.

Коэффициент нестационарного теплообмена является количественным показателем теплопередачи от горного массива к воздушному потоку. Он представляет собой количество тепла, переданного воздушному потоку из глубины породного массива через 1 м² поверхности выработки в единицу времени при разности температур глубинных слоев массива и воздуха в 1 К.

С учетом установленных закономерностей тепловой поток из окружающего горного массива существенно зависит от продолжительности времени, прошедшего с момента обнажения пород. В момент обнажения пород тепловой поток из окружающего массива имеет наибольшее значение, затем величина его неравномерно уменьшается в зависимости от продолжительности проветривания. При этом, в случае небольшого срока существования выработки, незначительное изменение времени проветривания вызывает существенное изменение интенсивности теплового потока. Если же срок существования выработки исчисляется годами, то величина коэффициента нестационарного теплообмена во времени изменяется незначительно.

Горные породы в естественных условиях залегания всегда содержат влагу. Содержание влаги колеблется в значительных пределах в зависимости от многих факторов (глубины залегания, пористости, трещиноватости пород и т.д.).

Рудничный воздух при взаимодействии с горным массивом, имеющим температурное и влажностное поля, изменяет тепловлажностные параметры вследствие совместно протекающего нестационарного процесса тепло – и массообмена между поверхностью выработки и воздухом. Массообменные процессы приводят к более интенсивному охлаждению горных пород из-за

переноса тепла массой вещества (испаряющейся влаги) в атмосферу выработки. Следствием тепло- и массообменных процессов является образование охлажденной и осушенной зоны в массиве вокруг горных выработок, оказывающей большое сопротивление переходу тепла из окружающего горного массива к рудничному воздуху, и, как следствие, происходит снижение интенсивности тепло- и массопереноса во времени.

В связи с повышением энерговооруженности выемочных участков и тупиковых подготовительных выработок возрастает удельный вес тепловыделений от работы электрических машин и механизмов в общем тепловом балансе горных выработок.

В общем случае тепловая мощность (Q_3 , Вт), выделяемая при работе электрических машин (выемочных и проходческих комбайнов, конвейеров, породопогрузочных машин, и т.п.), определяется по известной формуле

$$Q_3 = \frac{N_3}{\eta_3} k_3, \quad (1.5)$$

где N_3 – мощность на валу электродвигателя, Вт;

η_3 – к.п.д. электродвигателя;

k_3 – коэффициент загрузки электродвигателя. Количество теплоты например, вносимой вентилятором местного проветривания, зависит от условий его работы, развиваемого напора, потребляемой мощности, к.п.д. и прочих факторов.

Мощность (N_3 , Вт), расходуемая на создание кинетической энергии воздушного потока, создание статистического давления для преодоления аэродинамического сопротивления и на внутренние потери энергии в вентиляторе, выражается известной формулой

$$N_3 = \frac{V_B \cdot h}{\eta_B}, \quad (1.6)$$

где V_B – производительность вентилятора, м³/с;

h – напор вентилятора, Па;

η_B – к.п.д. вентилятора.

Общая тепловая мощность (Q_B , Вт), выделенная при работе вентилятора [4 с.52]

$$Q_B = \frac{N_э}{\eta_э} = \frac{V_B \cdot h}{\eta_B \cdot \eta_э}, \quad (1.7)$$

где $\eta_э$ – к.п.д. электродвигателя вентилятора.

При нагнетательном проветривании тупиковой выработки осевым вентилятором все тепло, образующееся при работе вентилятора, поступает с воздухом в забой. В случае применения вентилятора центробежного типа, у которого привод расположен вне потока подаваемого воздуха, тепло, выделяемое электродвигателем, не поступает в вентиляционную струю, поэтому тепловая мощность, воспринимаемая вентиляционным потоком, эквивалентна мощности, расходуемой на аэродинамическое сжатие и внутренние потери энергии в вентиляторе. При всасывающем проветривании тепло от работы вентилятора не влияет на тепловые условия в выработке

В настоящее время имеется достаточно апробированная методика расчета тепловыделений от местных источников, которая используется при тепловых расчетах горных выработок. Тепловой режим общешахтных, групповых и участковых воздухоподающих выработок глубоких шахт формируется в результате одновременного воздействия тепловыделений от окружающего горного массива, транспортируемой горной массы, работы транспортных устройств, машин и механизмов с электроприводом, работающих по пути следования свежего воздуха к очистным забоям, и других менее значительных источников.

Повышение начальной температуры угля с 303,2 К до 323,2 К,

соответствующее увеличению глубины разработки в среднем с 800 м до 1400 м, при прочих равных условиях, может привести к значительному возрастанию теплопритока от транспортируемого ископаемого. Для рассматриваемых условий тепловыделение от ископаемого при начальной температуре 232,2 К будет в 3,7 раза больше, чем при температуре 303,2 К. Это обусловлено не только увеличением температурного напора от ископаемого к воздуху, но и увеличением разности парциальных давлений пара в воздухе и у поверхности транспортируемого ископаемого.

Существенное влияние на величину тепловыделения от угля оказывают интенсивность теплообмена, зависящая от скорости движения воздуха и насыпки на конвейере, влажности воздуха и др.

Повышение средней скорости движения воздуха в выработке увеличивает интенсивность теплообмена между ископаемым и воздухом. Повышение скорости воздуха с 1 до 4 м/с может привести к увеличению тепловыделения от транспортируемого угля в 2 раза.

При транспортировании ископаемого в вагонетках на величину тепловыделений оказывают влияние количество и температура транспортируемого ископаемого, температура и относительная влажность воздуха, поступающего на проветривание выемочного участка, емкость вагонетки, продолжительность транспортировки и др.

Величина тепловыделения от ископаемого в вагонетке прямо пропорциональна количеству транспортируемого ископаемого.

При увеличении начальной температуры ископаемого с ростом глубины разработки так же, как и при конвейерном транспорте, повышается тепловыделение от ископаемого. Основная часть тепла (50-60%) передается воздуху с открытой поверхности ископаемого в вагонетках путем испарения влаги.

Снижению тепловыделений от ископаемого в вагонетках способствуют уменьшение продолжительности транспортировки ископаемого по выработке за счет увеличения скорости движения состава и уменьшения простоев, увеличение

емкости вагонетки в связи со снижением величины теплопередающей поверхности ископаемого.

В выработках с конвейерной доставкой при грузопотоке 50-100 т/ч тепловыделение при транспортировке угля конвейерами может составлять 38-54% от тепловыделений всех источников тепла в конвейерной выработке.

При транспортировке в вагонетках тепловыделение от транспортируемого ископаемого в участковых воздухоподающих выработках составляет 5-15% общих тепловыделений.

При контакте воздуха с шахтной водой и влажными стенками горных выработок происходит непрерывный процесс тепло- и влагообмена - конвективный теплообмен, обусловленный разностью температур воздуха и воды, и испарение влаги, обусловленное разностью парциальных давлений водяных паров у поверхности воды и в воздухе, и теплообмен излучением. Теплообмен излучением ввиду сравнительно небольшой разности в температурах между воздухом и водой составляет весьма незначительную часть общего теплообмена и при расчетах, как правило, не учитывается. Направление процессов тепло- и влагообмена зависит от температуры и относительной влажности воздуха, влажностного состояния стенок горных выработок и температуры воды в водосточной канавке.

В воздухоподающих стволах с наличием капежа воды поступающий в шахту воздух вступает в контакт с мокрыми стенками ствола и каплями падающей воды. Чем суше и теплее воздух на поверхности, тем интенсивнее процессы тепловлагообмена в стволе. В стволах с притоком воды из верхних водоносных горизонтов температура воздуха в летний период года существенно снижается. Процесс охлаждения сопровождается интенсивным влагообменом, обусловленным высоким потенциалом переноса влаги. В зимний период года происходит повышение температуры поступающего воздуха. Вследствие низкой его температуры влагопоглотительная способность воздуха значительно ниже, чем летом. В связи с этим, влагосодержание воздуха в околоствольном дворе в летний период года существенно превышает значение его в холодное время года.

Шахтная вода, протекающая в водосточных канавках, имеет более высокую температуру, чем воздух в выработке, и, следовательно, оказывает нагревающее действие на вентиляционную струю. Наличие открытых поверхностей воды в воздухоподающих выработках способствует интенсивному насыщению воздуха влагой, что существенно ухудшает тепловые условия и показатели шахтного микроклимата.

Тепловая мощность, воспринимаемая воздухом от шахтной воды в выработке с открытой канавкой, определяется по известной формуле [4 с.42]

$$Q_B = F_B \cdot \alpha \cdot (t_B - t_1) + \beta (p_H^{t_B} - \varphi_{cp} \cdot p^{t_1}), \quad (1.8)$$

где F_B – поверхность теплоотдачи шахтной воды, м²;

α – коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки выработки (воды) к воздуху, Вт/(м² · К)

$$\alpha = 2,33 \cdot \varepsilon (\rho \cdot \nu)^{0,8} \cdot \left(\frac{U}{S} \right)^{0,2}, \quad (1.9)$$

где ε – коэффициент шероховатости, зависящий от вида крепи в выработке. Для выработок с монолитной бетонной крепью $\varepsilon=1,0$; для выработок с металлической, железобетонной и деревянной крепью со сплошной затяжкой $\varepsilon=1,5$; с той же крепью без затяжки $\varepsilon=2,0$; для выработок без крепи $\varepsilon=2,5$; для лав $\varepsilon=2,5-3,5$;

ν – плотность воздуха, кг/м³

$$\rho = 3,484 \cdot 10^{-3} \frac{p - \varphi_{cp} \cdot P^{t_1}}{273 + t_{cp}} \quad (1.10)$$

φ_{cp} – среднее значение относительной влажности воздуха в выработке, д.ед.;

t_{cp} – среднее значение температуры воздуха в выработке, К;

p – барометрическое давление воздуха в выработке, Па;

p^{t_b}, p^{t_1} – парциальное давление водяных паров при температурах t_b и t_1 , Па.

v – скорость движения воздуха в выработке, м/с;

U – периметр среднего по длине расчетного участка поперечного сечения выработки, м;

S – площадь поперечного сечения выработки, м²;

β – коэффициент теплоотдачи испарением, Вт/м² · Па [6]

$$\beta = \alpha \frac{1500 + 2,75(t_b + t_1)}{p}; \quad (1.11)$$

t_1 – температура воздуха в начале горной выработки, К;

t_b – температура шахтной воды в канавке, К;

Значение t_b принимается по данным замеров. При отсутствии данных в расчетах принимается следующий перепад температуры между шахтной водой и воздухом $\Delta t_b = t_b - t_1$:

– в выработках, расположенных на расстоянии до 500 м от ствола,
 $\Delta t_b = 4-5$ К;

– в выработках, удаленных на расстояние до 1500 м от ствола,
 $\Delta t_b = 21,5-2,5$ К;

– в выработках, удаленных от ствола на расстояние свыше 1500 м,
 $\Delta t_b = 1,0-1,5$ К;

– в участковых воздухоподающих выработках, $\Delta t_b = 1,0-1,5$ К.

По данным наблюдений в шахтах температура воды в водосточных канавках горных выработок, проветриваемых за счет общешахтной депрессии, на 3,0-6,0 К выше среднего значения температуры воздуха в этих выработках. В тупиковых выработках температура шахтной воды превышает температуру исходящей вентиляционной струи на 1,0-3,0 К.

1.2 Анализ влияния повышенной температуры воздуха рабочей зоны на организм горнорабочих

В ходе анализа горнотехнической документации горнодобывающих предприятий и тепловых съемок, ранее проведенных МакНИИ, были выявлены локальные участки горных выработок, в которых на протяжении всей рабочей смены находятся подземные горнорабочие: пункты погрузки и перегрузки горной массы; забои тупиковых выработок; места выполнения ремонтных работ в участковой выработке и др., где установлено превышение температуры рудничного воздуха.

Нормативы микроклиматических условий устанавливаются в результате непосредственного наблюдения за состоянием работающих, выполняющих разные работы при разных соотношениях температуры, влажности и скорости вентиляционной струи. Наблюдение за большим количеством рабочих позволяет установить различные комбинации метеорологических параметров, которые создают параметры, одинаково благоприятные для работы. В результате формирования у наблюдаемых рабочих тепловых ощущений, одновременно, контролируя при этом, терморегуляцию организма различными физиологическими методами устанавливается верхняя граница допустимых климатических условий в шахте, при которых возможно обеспечить нормальную производительность труда.

Предельные климатические условия на рабочих местах варьируются от страны к стране. В горном деле это происходит как в методике измерения климатических условий, так и в определении продуктивности и гигиены труда при различной вариации метеорологических факторов. Эти различия во многом зависят от географических условий, например, горнорабочие в ЮАР быстрее проходят акклиматизацию к нагревающему микроклимату в шахте и лучше его переносят.

В организме человека как при физическом труде, так и в состоянии покоя постоянно выделяется значительное количество тепла, которое отводится от него

конвекцией, излучением и испарением. Его источником являются метаболические процессы, которые постоянно протекают на протяжении всей жизни человека, а также энергия воспринимаемая поверхностью тела из нагревающего микроклимата рабочей зоны. Благодаря обменным процессам, происходящим в организме человека, всего за час выделяется такое количество тепла, которого хватило бы для нагрева одного литра воды от 273,2 до 373,2 К.

Метаболизм основан на их биохимической трансформации: питательные вещества, поступающие в организм после пищеварения, расщепляются на ряд элементов, которые усваиваются и используются для создания новых клеток взамен погибших. Потребление этих элементов сопровождается их окислением в тканях с помощью кислорода, который поступает с кровью из легких.

Интенсивность процессов окисления и количество выделяемого при этом тепла может варьироваться. В процессе трудовой деятельности выработка тепла организмом увеличиваются в 2-3 раза и более, чем в состоянии покоя. В состоянии покоя за час образуется около 80 ккал тепла, при нормальной работе 150–250, а при высоком напряжении около 400 ккал тепла. Суммарная выработка тепла в сутки достигает 2500–3250 ккал.

Если бы процесс передачи тепла во внешнюю среду не происходил одновременно с выделением тепла, температура тела повысилась бы на 1,0 К за один час в состоянии покоя, а при интенсивной трудовой деятельности – за 5 минут. Из вышесказанного следует, что чем больше выделяется тепла, тем сильнее должна повыситься температура тела, однако в действительности же температура человеческого тела остается на довольно высоком, но относительно неизменном уровне.

Поддержание температуры тела на одном уровне достигается в большей части за счет варьирования интенсивности теплопередачи в окружающую среду (физической терморегуляции). Терморегуляция организма осуществляется независимо от воли человека под воздействием рефлекторного механизма.

Физическая регуляция в человеческом теле происходит за счет выделения избыточного тепла, которое в основном выводится через кожу в результате испарения пота и передачи тепла в окружающее пространство. Остальное используется для нагрева вдыхаемого человеком воздуха и принимаемой пищи.

Человеческое тело излучает разное количество тепла в зависимости от параметров окружающего воздуха и вида работы. Если температура воздуха соответствует температуре поверхности тела, тепло выделяемое организмом рассеивается только за счет испарения влаги. Тепловое равновесие тела поддерживается на одном уровне, поскольку организм может регулировать количество испаряющейся влаги в зависимости от изменений параметров воздуха. Когда влажность воздуха в рабочей зоне увеличивается при высоких температурах, эффект охлаждающего воздействия воздуха на человеческий организм уменьшается, а при низких температурах он усиливается из-за увеличения его теплопроводности. Движение воздуха улучшает как теплопередачу за счет конвекции, так и теплопередачу за счет испарения, особенно когда воздушная струя «омывает» влажную поверхность тела или одежды.

Сочетание высокой температуры и влажности рудничной атмосферы в глубоких шахтах создает крайне неблагоприятные условия для возможности терморегуляции организма и приводит к перегреву тела, что повышает вероятность теплового удара. В связи с этим нормализация микроклимата на рабочих местах в горных выработках является одной из наиболее важных проблем горной гигиены.

Для оценки микроклимата глубоких шахт были проведены исследования ряда действующих очистных и подготовительных забоев шахт в ДНР. Проведенными исследованиями установлено, что очистные и подготовительные забои с температурой воздуха более 299,2 К находятся на глубине 700 – 1500 м и, как правило, удалены от воздухоподающих стволов на расстояние 3000 – 4000 м.

Горные выработки, предназначенные для проветривания удаленных забоев, имеют недостаточные по температурному фактору сечения, что приводит к

значительному нагреву свежего воздуха, проходящего по сети подземных выработок. Воздух, поступающий к удаленным забоям, имеет температуру 298,2 – 307,2 К и относительную влажность 80 – 90% [7].

В забоях подготовительных и очистных выработок рудничный воздух поглощает тепло в основном от свежееобнаженных пород, а также от работающих механизмов. Например, температура тормозных барабанов ППМ–4 при интенсивной работе машины достигает 343,2 – 353,2 К, температура комбайновых электродвигателей 316,2 – 320,2 К.

Большое влияние на температуру рудничного воздуха в забое оказывают также взрывные работы, особенно в тупиковых подготовительных выработках большего сечения, где воздух обогащается значительным количеством ядовитых и вредных газов возникающих вследствие ведения взрывных работ.

В связи с тяжелыми температурными условиями в исследованных забоях производительность труда рабочих, как правило, была низкой, что объясняется снижением терморегуляционной активности организма. На основе аналитических уравнений теплофизических процессов выведена формула теплового баланса человека применительно к шахтным условиям, которые разделены на три группы: в первой температура поверхности горных выработок ниже температуры тела человека, во второй – одинаковая и третьей – выше температуры тела человека. В первом случае тепловая радиация будет облегчать процесс терморегуляции, во втором – уравниваться и в третьем – способствовать накоплению тепла организмом.

Тепловые расчеты для глубоких шахт основаны на теории конвективного и лучистого теплообмена, а также теплоотдачи с помощью испарения.

Лучистый теплообмен осуществляется путем обмена тепловой энергией человеческого тела с окружающей средой. При этом рассматривается только теплообмен посредством излучения в области инфрокрасной части спектра электромагнитных колебаний. В данных условиях для расчета необходимо пользоваться формулой, полученной на основании закона Стефана-Больцмана [8].

$$Q_{\text{рад}} = C \cdot F_{\text{изл}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (1.12)$$

где $Q_{\text{рад}}$ – количество тепла, передаваемого радиацией, ккал/ч;

C – коэффициент взаимной радиации, для данного случая $C = 4,5 \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{ч}(\text{К})^4$;

$F_{\text{изл}}$ – излучающая поверхность тела человека, м^2 ;

$T_{\text{п}}$ – абсолютная температура излучающей поверхности тела, К;

T_0 – абсолютная температура окружающих поверхностей, К.

В рассматриваемом случае коэффициент взаимной радиации равен коэффициенту радиации поверхности тела человека. Излучающая поверхность тела человека $F_{\text{изл}}$ меньше его общей поверхности, так как отдельные участки взаимно облучаются и не участвуют в теплообмене с поверхностями, окружающими человека. Площадь излучения принимается равной 1,5-1,6 м^2 , полная поверхность для стандартного человека составляет 1,8 м^2 . Конвективный теплообмен есть функция разности температуры тела и воздуха, скорости движения воздушного потока. Для определения теплообмена принимаем формулу, выведенную на основе закона Ньютона, которая справедлива для человека, как в одежде, так и без одежды

$$Q_{\text{конв}} = \alpha_{\text{конв}} \cdot F_{\text{конв}} (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), \text{ ккал/с}, \quad (1.13)$$

где $\alpha_{\text{конв}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\text{ккал/м}^2 \cdot \text{с}$;

$F_{\text{конв}}$ – поверхность тела, м^2 ;

$t_{\text{п}}$ – температура поверхности тела (одежды) К;

$t_{\text{в}}$ – температура окружающего воздуха, К.

В приведенной формуле наиболее сложным является расчет коэффициента теплоотдачи, так как его величина непостоянна и является функцией температуры воздуха, барометрического давления, скорости движения воздуха, формы поверхности тела его размеров и других факторов.

Для определения величины $\alpha_{\text{конв}}$ у поверхности тела человека за основу принимаем формулу

$$\alpha_{\text{конв}} = \frac{0,18 \cdot \lambda}{l} \cdot \left(\frac{v \cdot l}{\gamma} \right)^{0.62}, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2} \cdot \text{ч}, \quad (1.14)$$

где l – размер тела, который принимается равным ширине тела обнаженного до пояса человека ($l = 0,35 \div 0,4 \text{ м}$);

$v = v_g + v_q$ – суммарная скорость воздуха, м/с;

v_g – скорость воздуха относительно неподвижного тела, м/с;

v_q – скорость движения тела при работе, м/с;

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, ккал/м · с · К;

γ – коэффициент кинематической вязкости воздуха, м²/с.

Теплоотдача испарением является функцией разницы между максимально возможным напряжением паров при температуре поверхности тела и существующим напряжением водяных паров в воздухе. Наиболее полно отвечает указанным условиям расчетная формула, предложенная Л. Оппл и М. Йокл,

$$Q_{\text{исп}} = \alpha_{\text{в}} \cdot W \cdot F_{\text{исп}} \cdot (P_{\text{т}} - P_{\text{в}}), \text{ ккал/с}, \quad (1.15)$$

где $\alpha_{\text{в}}$ – коэффициент перехода тепла при испарении пота на поверхности тела, ккал/м², Па.;

$F_{\text{исп}}$ – часть поверхности тела, покрытая потом, $F_{\text{исп}} = 1,67 \text{ м}^2$;

W – коэффициент увлажнения кожи при работе в глубоких шахтах $W = 1$;

$P_{\text{т}}$ – парциальное давление водяного пара в насыщенном воздухе над поверхностью тела человека (при температуре тела), Па;

$P_{\text{в}}$ – парциальное давление водяного пара в окружающем воздухе, Па.

Коэффициент $\alpha_{\text{в}}$ зависит от свойств одежды и скорости движения воздуха и для одетого человека выражен зависимостью

$$\alpha_B = 1,25 \cdot K, \text{ ккал/м}^2 \cdot \text{с, Па}, \quad (1.16)$$

где K – коэффициент теплопередачи для спецодежды шахтеров: $K = 3,18 - -3,8$ ккал/м² · с, Па; для шахтных условий $\alpha_B = 4,4$ ккал/м² · с, Па.

С учетом этого расчетная формула для определения теплоотдачи испарением для условий глубоких шахт примет вид:

$$Q_{\text{исп}} = 4,4 \cdot F_{\text{исп}} \cdot (P_T - P_B), \text{ ккал/с.} \quad (1.17)$$

Таким образом, общее количество тепла, отдаваемое человеком в окружающую среду в течение одного часа в шахтных условиях, в общем виде может быть представлена как сумма перечисленных выше отдельных видов теплоотдачи:

$$Q_{\text{общ}} = Q_{\text{раг}} + Q_{\text{конв}} + Q_{\text{исп}}, \text{ ккал/с,} \quad (1.18)$$

или в развернутом виде:

$$Q_{\text{общ}} = 4,5F_{\text{изл}} \left[\left(\frac{T_{\text{п}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right] + \frac{0,18\lambda}{e} \left(\frac{v \cdot l}{\gamma} \right)^{0,62} \cdot F_{\text{конв}} (t_{\text{п}} - t_{\text{в}}) + 4,4F_{\text{исп}} (P_T - P_B), \text{ ккал/с.} \quad (1.19)$$

Теплообмен испарения влаги в легких, нагреванием воздуха при дыхании и теплообмен кондукцией исключены в связи с их малым предельным весом в общем тепловом балансе человека.

Для качественной оценки лучистого тепла произведен расчет составных частей теплового баланса горнорабочего применительно к наиболее характерным климатическим шахтным условиям: температура воздуха 299,2 К (максимально допустимая по ПБ); и относительная влажность воздуха 98%; скорость движения воздуха 2 м/с, температура окружающих поверхностей горных пород изменяется от 293,2 до 343,2 К. При выполнении физической работы у человека повышается температура тела, которая является определяющим критерием степени тяжести труда.

В таблице 1.2. приведены результаты исследований, выполненных в специальной климатической камере на 30 подземных рабочих, имеющих полную адаптацию к шахтным условиям [8 с. 57].

Таблица 1.2.

Результаты исследований в климатической камере

Температура воздуха, К		Температура поверхности тела, К	
воздуха	стенки камеры	до работы	в первый час работы
293,2	269,2	303,6	306,0
299,2	302,2	304,7	307,2
305,2	308,2	305,3	308,9

Одновременно измерение температуры поверхности тела человека производилось датчиками. В расчетах температуры поверхности тела принимаются равные 305,2 и 308,2 К.

По результатам расчета построен график теплового баланса человека, состоящий из 3 зон (рисунок 1.1).

1. Температура поверхности горных пород ниже температуры поверхности тела и одежды человека. Все виды теплообмена: конвективный, лучистый и теплообмен испарением влаги с поверхности тела человека – охлаждает организм. Эта зона характерна тем, что лучистый теплообмен способствует охлаждению организма, например, при температуре поверхности пород 293,2 К доля лучистого теплообмена по охлаждению составляет 100 ккал/ч, или 25% теплового баланса человека. По мере повышения температуры поверхности горных пород соответственно снижается охлаждающий эффект, а при 307,2 К он равен нулю, т.е. происходит лучистый теплообмен. В климатической зоне этой области человек может выполнять физическую работу без какого-либо напряжения терморегуляционного аппарата с интенсивностью от 180 до 300 ккал/ч.

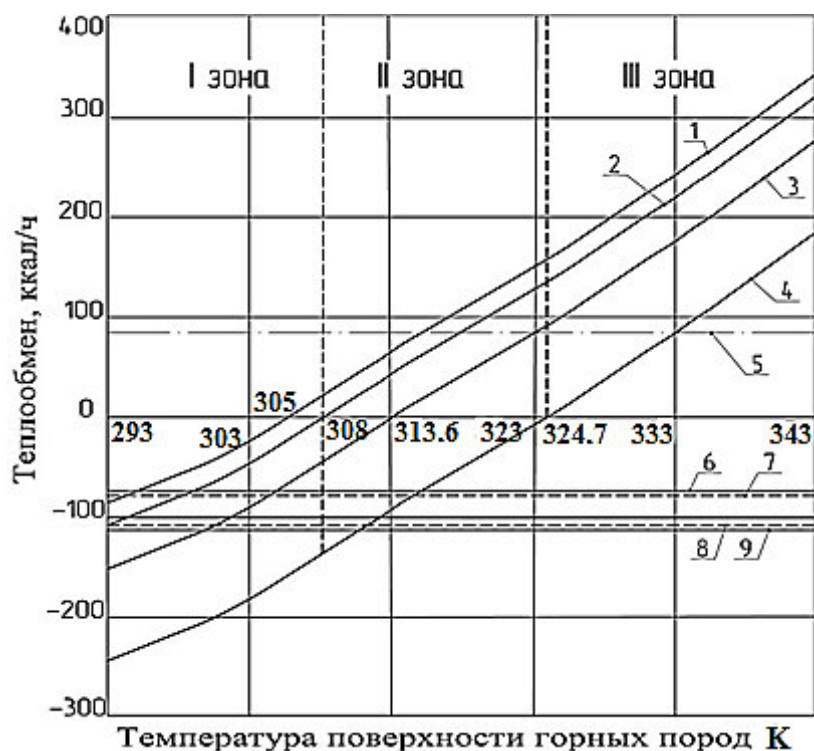


Рисунок 1.1 – График теплового баланса человека в зависимости от температуры поверхности горных выработок:

1, 2 – лучистый теплообмен; 3, 4 – общий теплообмен; 5 – теплопродукция, обусловленная нормальным обменом веществ; 6, 9 – теплообмен испарением; 7, 8 – конвективный теплообмен.

2. Температура поверхности горных пород изменяется от 305,2 до 324,7 К. В этих условиях конвективный теплообмен и испарение влаги с поверхности охлаждает организм человека, а вот чистый теплообмен нагревает его. Характерным для этой зоны является повышение нагрева организма за счет роста интенсивности лучистого тепла вследствие увеличения температуры окружающих поверхностей, который компенсируется конвективным теплообменом и испарением влаги с поверхности. В данной зоне тепловая обстановка не позволяет производить физическую работу выше легкой (150 ккал/ч). С ростом температуры поверхности окружающих горных пород эта возможность сокращается, а при температуре воздуха 299,2 К и температуре окружающих поверхностей 324,7 К человек не в состоянии выполнять работу.

Для проверки состояния человека в тепловой обстановке в начале этой зоны в климатической камере были проведены эксперименты с горнорабочими,

выполнившими работу на уровне 300 ккал/ч. Из 30 рабочих только 14 смогли поработать более 1 часа. У испытуемых резко повышалась температура тела до 311,2 – 312,2 К, пульс учащался до 150 ударов в минуту, возникало безразличное отношение к окружающему. Отсюда видно, что в общем тепловом балансе человека лучистый теплообмен является решающим и наряду с обычными способами охлаждения обязательным становятся снижение радиационного теплообмена, которое заключается в снижении температуры пород в массиве и холодном экранировании.

3. Температура поверхностей окружающих горных пород равна 324,7 К и более. Эта зона положительных тепловых балансов человека. При температуре 324,7 К лучистый теплообмен превышает сумму конвективного теплообмена и охлаждения испарений влаги с поверхности тела человека. Присутствие человека в данной климатической зоне опасно из-за очень быстрого роста температуры тела человека, при которой наступает тепловой удар.

С учетом принятых в теоретических расчетах характерных параметров микроклимата глубоких шахт и на основе прогноза температур горных пород с ростом глубины разработки в первую зону входят шахты глубиной до 850 м, во вторую зону – от 850 до 1550 м, и в третью – шахты глубиной более 1550 м.

В связи с тем, что границы между второй и третьей зоной, т.е. нулевого баланса человека, зависит от температуры воздуха, авторами определены эти точки для температур воздуха 295,2, 299,2, 303,2 и 307,2 К (рисунок 1.2) [8 с. 18]. Анализируя результаты расчета, видим, что с ростом температуры воздуха эта точка перемещается в сторону более низких температур поверхностей окружающих пород.

Для данных температур воздуха в точках нулевого баланса лучистый теплообмен в общем тепловом балансе человека в процентном отношении имеет соответственно следующие величины: 39,8; 63,8; 75,8% (к сумме конвективного теплообмена и охлаждения испарением влаги с поверхности).

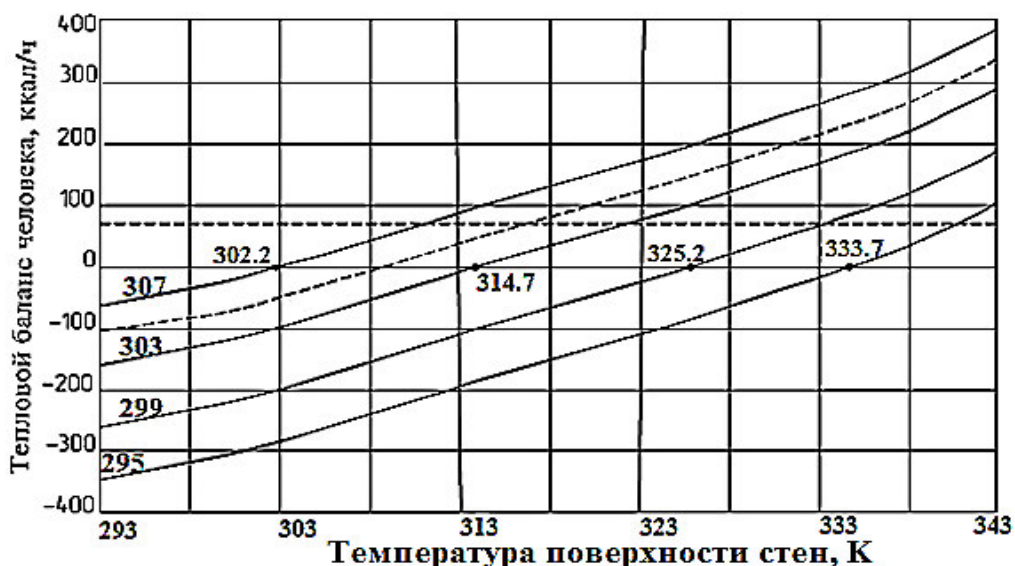


Рисунок 1.2 – График теплового баланса человека при переменных температурах поверхности горных выработок и воздуха

Для нормальной жизнедеятельности человека важно поддерживать тепловой баланс в его организме, при котором выработка и потери тепловой энергии в нем одинаковы, а температура остается постоянной. Однако степень охлаждающего воздействия микроклимата в рабочей зоне не всегда соответствует степени напряжения в организме и способствует нарушению теплового баланса в нем. Эффект недостаточного или чрезмерного охлаждения атмосферы нарушает это равновесие, что сопровождается накоплением тепловой энергии в организме при повышении его температуры или острым респираторным заболеваниями.

Согласно анализу температурного режима в шахтах Донбасса [5 с. 68], 36 очистных и 24 подготовительные выработки эксплуатируются с температурой воздуха значительно превышающей допустимые нормы (таблица 1.3.).

Таблица 1.3.

Средняя температура рудничного воздуха в горных выработках

Тип выработки	Кол-во	Средняя глубина разработки, м	Средняя энерговооруженность, кВт	Средняя температура пород, К	Средняя температура воздуха и относительной влажности, К, ф%
Воздухоподающая выработка	36	950	710	306,5	298,2/78-29,0/85
Очистной забой	36	833	400	307,1	300,2/86-33,0/95

Тип выработки	Кол-во	Средняя глубина разработки, м	Средняя энерговооруженность, кВт	Средняя температура пород, К	Средняя температура воздуха и относительной влажности, К, ф%
Призабойная зона подготовительных выработок	24	1034	300	308,9	302,2/90-40,0/88

Работа горнорабочих в условиях нагревающего микроклимата рабочей зоны физиологически вредна и непродуктивна. В шахтах с температурой воздуха 303,2 К производительность труда рабочих, по оценке ученых [9, 10], снижается более чем на 50% по сравнению с производительностью в нормальных климатических условиях (рисунок 1.3).

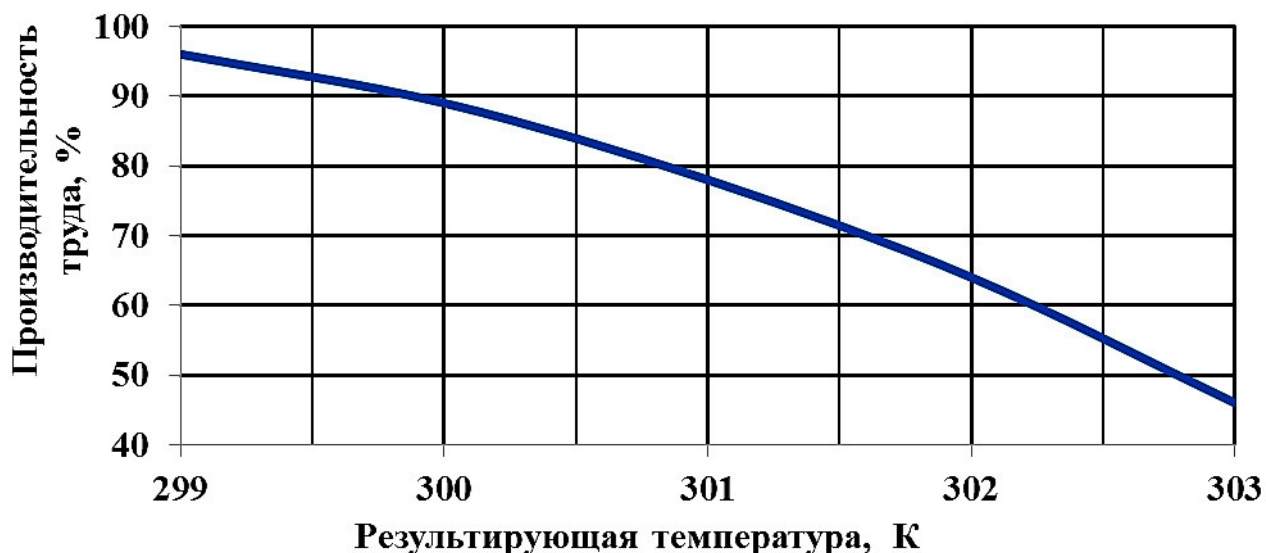


Рисунок 1.3 – Зависимость производительности труда шахтеров от результирующей температуры воздуха в зоне ведения работ горных выработок

Исследования функционирования человека в процессе трудовой деятельности показывают, что и физические возможности, и вероятность ошибок изменяются с уровнем утомления. Утомляемость во время работы является функцией тяжести труда, а также условий микроклимата рабочей зоны.

Повышенные температуры и влажность рудничного воздуха не только существенно понижают продуктивность труда, но и способствуют формированию в организме человека негативных компенсаторных функций, которые впоследствии развивают патологии дыхательной, нервной, сердечнососудистой

системы и органов костно-мышечной группы, инициируют значительный рост общей профессиональной заболеваемости трудящихся [11, 12]. Профессиональные заболевания, связанные с работой в нагревающем микроклимате рабочей зоны часто, становятся опасными для жизни человека, патологическое действие вышеперечисленных факторов зачастую проявляются следующим образом:

В результате выделения значительного количества пота наступает общее утомление организма (так же возможен рост его температуры). От недостатка солей в крови могут возникнуть спазмы мышц (судороги в конечностях);

– нарушение нормального процесса теплообмена в организме влечет за собой наступление теплового истощения, являющееся специфичной защитой организма от нагрузки сердечнососудистой системы. Тепловое истощение сопровождается повышенным сердцебиением (до 150-160 уд/мин) и резким падением артериального давления, что становится причиной снижения притока крови к мозгу, что в свою очередь вызывает головокружение, тошноту, рвоту и потерю сознания. При этом температура тела опускается ниже 308,2 К;

– тепловой удар – это полное физическое нарушение механизма охлаждения тела. Человек, перенесший ранее тепловой удар, жалуется на тошноту и головокружение, может испытывать жажду, а в некоторых случаях возникает рвота. Через короткое время, если ему не окажут надлежащую медицинскую помощь, он упадет в обморок. Прекращается потоотделение, кожа становится сухой и горячей, температура тела повышается до 315,2 К и выше, пульс значительно учащается. Смерть обычно наступает в течение нескольких часов. Ведение учета травматизма полученных при выполнении работ в горных выработках с нагревающим микроклиматом, не включают такой вид травмы как тепловой удар, а указывается как сердечнососудистая недостаточность.

Основы норм микроклимата в глубоких шахтах Донбасса заложены в Правилах безопасности и Санитарных нормах. В действующих выработках, где в течение смены находятся люди, температура воздуха не должна превышать норм, приведенных в таблице 1.4. Если параметры микроклимата отличаются от

указанных, то должна применяться система мероприятий, направленных на предупреждение перегрева организма работающих.

Таблица 1.4.

Предельно-допустимая температура воздушного потока в горных выработках в зависимости от его скорости и относительной влажности

Скорость воздушного потока, м/с	Допустимая температура, К, при относительной влажности, %		
	75% и меньше	76-90%	более 90%
До 0,25	297,2	296,2	295,2
0,26-0,50	299,2	297,2	296,2
0,51-1,00	299,2	298,2	297,2
1,01 и более	299,2	299,2	299,2

При нормировании микроклимата учитывается не только температура, но также относительная влажность и скорость воздуха. Сочетание данных параметров позволяет поддерживать тепловой баланс организма трудящихся при средних физических нагрузках. Когда температура воздуха превышает нормативную. Например, при ликвидации последствий аварий временно разрешается производить работы по отраслевым нормативным документам.

Для предупреждения получения теплового удара горнорабочих вводится поправочный коэффициент (от 0,75 до 0,95), ограничивающий производительность или время пребывания рабочих в зонах повышенных температур воздуха.

Фактическая температура принимается за показатель, характеризующий климатические условия шахты, который зависит от температуры воздуха по сухому и влажному термометрам и скорости воздушной струи. Фактическая шкала температур была разработана на основе данных опроса большого количества горнорабочих по субъективным тепловым ощущениям. Климатические условия принимаются в качестве нормативных, когда температура воздуха по влажному и сухому термометру не превышает 297,2 – 299,2 К соответственно. Если климатические условия не соответствуют нормативным значениям, рабочее время сокращается. Горнорабочие, работающие при температуре воздуха 305,2 К и выше, должны быть оснащены средствами

индивидуальной защиты от теплового воздействия. Эти ограничения не распространяются на специальные работы, выполняемые в чрезвычайных ситуациях горноспасательными командами, для спасения людей, устранения опасности для их жизни или здоровья, устранения последствий аварий.

Косвенное влияние температуры воздуха в рабочей зоне на производственный травматизм проявляется как возрастающая величина показателя травматизма, фиксируемой по мере увеличения температуры воздуха. Таким образом, согласно данным исследований, выявлена тесная взаимосвязь между температурой воздуха в рабочей зоне и безопасностью труда шахтеров, что требует обеспечения нормативных температурных условий труда на рабочих местах в горных выработках.

Согласно данным опубликованных в работах [13,14] за период с 2003 по 2013 гг. в угольной промышленности произошло 1810 несчастных случаев со смертельным исходом, из которых 14.3% по причине острой сердечной недостаточности (рисунок 1.4).

Из приведенного анализа производственного травматизма следует, что в условиях горных выработок глубоких шахт Донбасса значительная часть летальных несчастных случаев происходит по причине тепловых ударов (острой сердечной недостаточности), что свидетельствует о необходимости выполнения комплекса мероприятий направленных на нормализацию условий труда по тепловому фактору. Нормализация температурных показателей рудничного воздуха, на сегодняшний день возможна только при применении комплекса средств охлаждения и горнотехнических мероприятий.

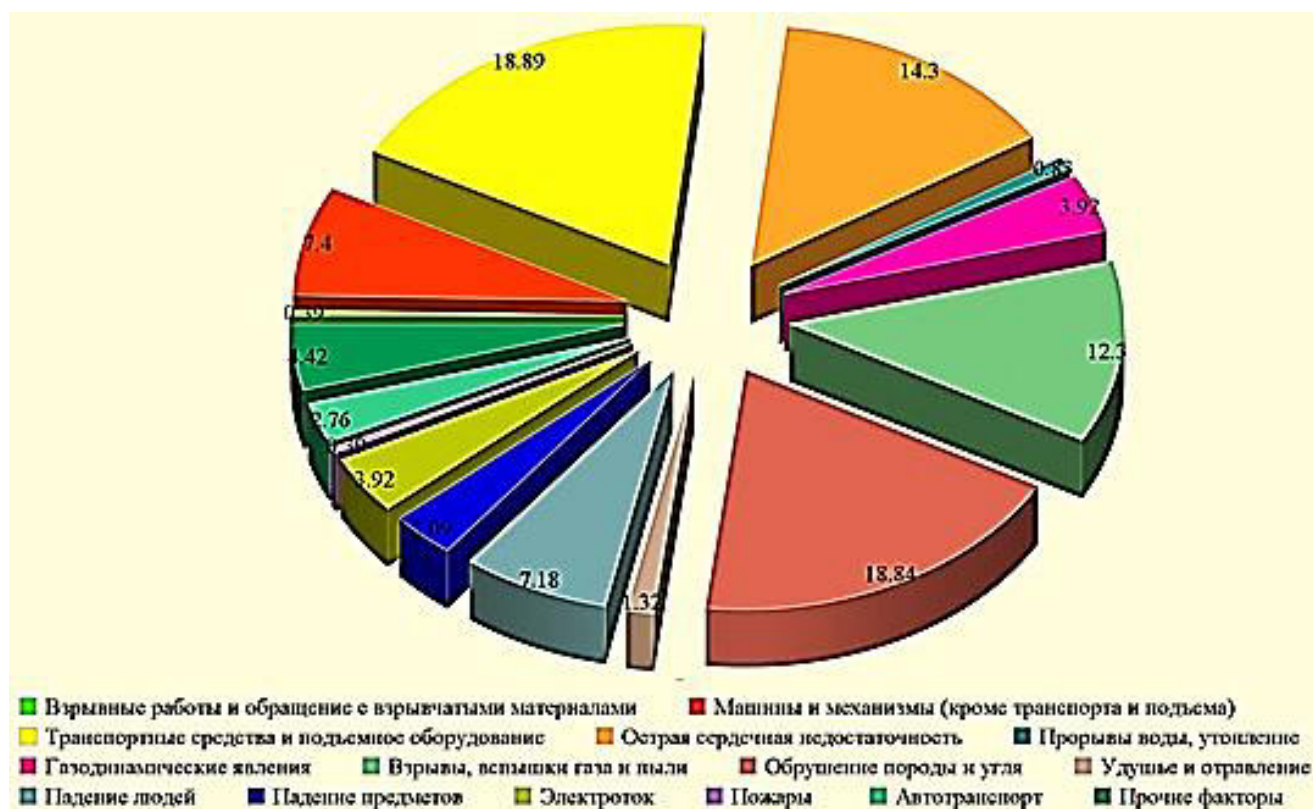


Рисунок 1.4 – Статистические данные травматизма с летальным исходом в угольной промышленности за период с 2003 по 2013 гг.

1.3 Анализ существующих средств и способов нормализации температурного режима в рабочей зоне горной выработки

Одним из основных направлений улучшения климатических условий в горных выработках глубоких шахт является снижение температуры воздуха, подаваемого на рабочие места за счет применения горнотехнических мероприятий. В сложившихся условиях нагрев и увлажнение воздуха обусловлено сложной вентиляционной сетью, большой протяженностью воздухоподающих выработок и значительной обводненностью. На основании выполненного анализа выделены основные факторы, влияющие на формирование тепловлажностных параметров атмосферы в горных выработках, а также установлены горнотехнические меры по нормализации тепловых условий в выработках.

Для сложившихся тепловых условий глубоких шахт наиболее эффективными являются следующее:

- увеличение расхода воздуха в выработках;
- применение схем вскрытия, рациональных по тепловому фактору, а также подготовка шахтных полей и технологических схем ведения горных работ;
- снижение влагонасыщения рудничного воздуха;
- снижение нагревания воздуха от местных источников тепловыделения.

По условию формирований тепловых условий в горных выработках технологические решения разработки пологих пластов подразделяются на 4 группы.

В первую группу входят технологические схемы с отработкой пластов длинными столбами восстанию или простиранию, с прямоточной схемой проветривания на выработанное пространство и подсвеживанием исходящей струи на транспортной выработке. Свежая струя подается по вентиляционной выработке, предназначенной в основном для вентиляции, а конвейерный транспорт и основное участковое оборудование размещается на транспортной выработке с подсвеживающей струей воздуха.

Во вторую группу входят технологические схемы с отработкой пластов по восстанию или простиранию в большинстве случаев по комбинированной системе. При этом применяется прямоточная схема проветривания с отводом исходящей струи на выработанное пространство. Температурные условия при этих технологических схемах ухудшаются по сравнению с первой группой, так как транспортируемая горная масса и применяемое электрооборудование добычного участка размещается в воздухоподающей горной выработке, как следствие холодопотребность при этом возрастает.

В третью группу входят технологические схемы с выемкой пластов длинными столбами по простиранию или восстанию и возвратноточной на угольный массив схемой вентиляции добычного участка. Свежий воздушный поток как и во второй группе технологических схем подается по выработке на

которой размещено электрооборудование добычного участка и производится конвейерная транспортировка разрушенной горной массы. Тепловые условия в очистных забоях при применении данной технологической схемы так же ухудшаются за счет поступления теплопритоков из выработанного пространства.

В четвертую группу технологических схем входят схемы, при которых выемка пласта ведется по простиранию сплошной системой разработки с использованием возвратной схемы проветривания с отводом исходящей струи на выработанное пространство. При применении данных технологических схем тепловые условия в очистных забоях наиболее тяжелые, так как дополнительно к недостаткам перечисленных в третьей группе технологических схем добавляются значительные утечки в выработанное пространство.

На основании приведенного анализа источников [1, с.36] установлено, что наиболее рациональной технологической схемой в сложившихся сложных климатических условиях являются схемы, при которых разработка пластов ведется по простиранию или восстанию по столбовой системе разработки. Проветривание добычных участков осуществляется обособленным разбавлением вредных примесей по источникам их поступления в рудничную атмосферу, а конвейерную транспортировку отбитой горной массы и электрооборудование добычного участка необходимо размещать в выработке с подсвежающей воздушной струей.

Наряду с внедрением рациональных по тепловому фактору технологических схем разработки угольных пластов производится разработка и внедрение целесообразных схем проветривания очистных и подготовительных забоев. Данные вентиляционные схемы включают в себя попутное движение воздушного потока и транспортируемой горной массы, а также преимущества подачи свежей воздушной струи в очистной забой по выработкам освобожденных от электрооборудования и конвейеров. При проходке подготовительных горных выработок наиболее часто встречается нагнетательный способ проветривания. Применение нагнетательного проветривания тупиковых выработок сопровождается сообщением нагнетаемому воздушному потоку тепла от

вентилятора местного проветривания. Прирост температуры воздуха подаваемого ВМП будет тем больше, чем больше общая мощность приводов ВМП и протяженность проводимой выработки. При проходке горных выработок большей длины прирост температуры воздуха от работы ВМП достигает 7-11 К. Для снижения температуры воздушного потока подаваемого в тупиковые горные выработки, рациональными считаются комбинированные схемы проветривания: нагнетательно-всасывающие и всасывающие. Одним из перспективных направлений регулирования температурных условий глубоких шахт является разработка и внедрение пространственно-планировочных решений со скважинами большего сечения. При этом шахтные вентиляционные системы позволят значительно сократить путь подачи свежего воздуха в очистные и подготовительные выработки, снижая тем самым его температуру [15].

Проведенные исследования теплового режима тупиковых горных выработок показали, что повышение температуры подаваемого воздуха существенное зависит от воздухопроницаемости материала трубопроводов и недостатков их конструкции. Для обеспечения планового расхода воздуха в шахтах зачастую устанавливают ВМП большей производительности, что приводит к дополнительному нагреву воздуха от энергоемких электроприводов. Улучшение аэродинамических характеристик вентиляционных трубопроводов было достигнуто путем введения в них рукавов синтетической пленки, т.е. создание комбинированного трубопровода. Применение комбинированного трубопровода в тупиковых выработках позволило снизить температуру воздуха в призабойных зонах на 1,4 – 2,2 К.

Применение горнотехнических способов улучшения температурного режима позволяет значительно снизить температуру воздуха на рабочих местах, однако следует отметить, что этого не достаточно для удовлетворения требованиям охраны труда. Для соблюдения требований охраны труда в настоящее время используются различные способы и средства охлаждения рудничного воздуха:

1. Разнообразные типы холодильных установок;

2. Охлаждение дросселированием;
3. Охлаждение с использованием вихревого эффекта;
5. Охлаждение путем изменения агрегатного состояния вещества;
6. Охлаждение путем расширения газов с совершением внешней работы.

Анализ известных и возможных теплотехнических способов охлаждения рудничного воздуха для глубоких шахт позволяет выделить следующие способы улучшения микроклимата в шахтах с применением холодильных машин:

1. Централизованное охлаждение всего поступающего в шахту воздуха на поверхности или в шахте;
2. Групповое охлаждение участка или полуцентрализованное охлаждение (охлаждение части воздуха, проходящего по горизонту);
3. Местное охлаждение (охлаждение отдельных забоев в шахте);
4. Комбинированное вхождение воздуха, поступающего в шахту, затем у забоя или в околоствольном дворе;
5. Передвижные кондиционеры при частичном проветривании.

Стационарные системы охлаждения рудничного воздуха разделяют на две основные группы:

- с размещением холодильных станций на поверхности;
- с размещением холодильных станций в горных выработках.

Передвижные системы охлаждения рудничного воздуха разделяют на следующие модификации:

- с размещением передвижной холодильной машины в горной выработке с отводом теплоты конденсации водой шахтного притока;
- с расположением передвижной холодильной машины в горной выработке и отводом теплоты конденсации водой, охлаждаемой в водоохладителе исходящей вентиляционной струей;
- с расположением передвижной холодильной машины в горной выработке и отводом теплоты конденсации в градирне на поверхности (с использованием теплообменника высокого давления).

Комбинированные системы охлаждения рудничного воздуха – состоят из двух и более ступеней охлаждения.

При этом необходимо отметить, что они не отличались высокой надежностью и работоспособностью, так как с наступлением холодов значительную часть турбо-компрессоров приходилось демонтировать и везти на завод изготовитель на ремонт. Впоследствии, отсутствие средств на ремонт изношенных и приобретение новых холодильных установок привело к тому, что число действующих на шахтах холодильных установок свелось к минимуму, а во многих очистных и подготовительных забоях температура горных пород достигает 310,2 – 322,2 К. Данные замеров температуры горного массива и температуры воздуха для шахт Донецкого бассейна приведены в работе [14 с. 42]. В работе предлагается структура теплового баланса горных выработок с учетом количества изопотенциальных поверхностей, с которыми воздух вступает в теплообмен и процессов, происходящих внутри объема воздуха.

Наиболее рациональным с экономической точки зрения и единственно возможным при существующих требованиях по обеспечению нормальной температуры на рабочих местах участка, а не по всем выработкам, является способ охлаждения воздуха размещением холодильного оборудования вблизи выемочных участков. Такой способ в настоящее время находит свое применение на шахтах Донбасса, однако многообразие условий горнотехнического и производственно-эксплуатационного характера еще не представляет возможности выработать универсальное и однозначное решение по исследуемому вопросу. Вместе с тем данный способ нормализации микроклимата является дорогостоящим процессом, ведущий к значительному росту себестоимости добываемого угля.

Охлаждение микроклимата рабочей зоны также осуществляется путем изолированного расширения газа. Этот процесс обратимого расширения газа с выполнением внешней работы при отсутствии теплообмена с внешней средой осуществляется в расширительных машинах поршневого, турбинного или

роторного типа. Применение воздушно-морозильных установок обосновано следующим:

- воздух как хладагент не токсичен и доступен. Сжатый воздух может быть подан по магистральной сети или сжат участковым (местным) компрессором;
- воздушно-морозильные установки занимают малую площадь, что крайне важно в условия стесненного пространства;
- все установки данного типа имеют высокую мобильность, а также малое время ввода и вывода с эксплуатации.

К недостаткам воздушно-морозильных установок относятся:

- высокая стоимость установок и их обслуживания;
- необходимость наличия источника сжатого воздуха, что ведет к еще большему удорожания процесса охлаждения;
- частый выход из строя и потребность дорогостоящего ремонта.

Перечисленные недостатки практически свели к минимуму применение turbo-холодильных установок в угольной промышленности.

Также перспективным направлением нормализации тепловых условий является применение водяного и специального льда. Применение льда для охлаждения рудничного воздуха началось еще в девятнадцатом веке. Herbst и Kohl сообщают о золотом и серебряном руднике в районе Comstock Gang в Washoe Mining District (США), который расположен в молодой вулканической зоне и поэтому демонстрирует необычайное повышение температуры микроклимата на рабочих местах. Условия в Comstock Gang были уникальными и экстремальными. Длительная и дорогостоящая борьба с температурными условиями была оправдана высоким содержанием золота и серебра. Во время строительства Simplontunnels лед также использовался для нормализации климатических условий - при температуре вмещающих пород значительно выше 323,2 К.

Pressel описывает в швейцарской строительной газете в 1906 году [16], среди прочего, метод охлаждения воздуха водяным льдом. Лед применялся в системе дополнительного охлаждения в течение нескольких месяцев. Основная

идея состояла в том, чтоб с охлаждаемого воздуха, вывести часть влаги в виде конденсата. Вспомогательная установка с тележкой для льда в Simplontunnels изображена на рисунке 1.5.

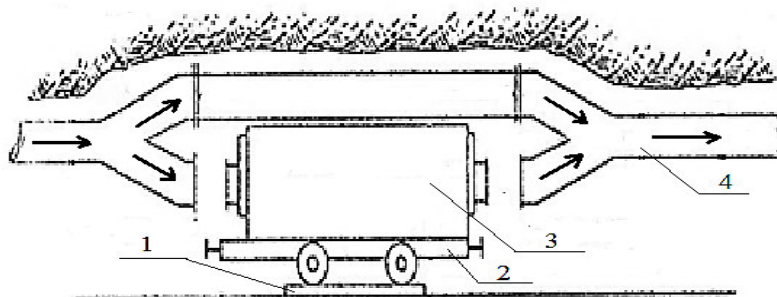


Рисунок 1.5 – Вспомогательная охлаждающая установка, перемещаемая по рельсовому пути:

(1) с резервуаром для льда (3), рама с буферно-сцепным устройством и колесными парами (2) и вентиляционного трубопровода (4).

Kohl и Herbst к недостаткам этого типа использования льда относят:

- дорогое производство льда;
- значительные сложности при транспортировке т.к. лед нагревается до температуры около 273,15 К, что приводит к потере части льда;
- под землей должны быть установлены дополнительные вентиляторы, которые продувают резервуары с водяным льдом. Для каждого рабочего места необходимо создавать отдельное охлаждающее устройство выполненные в виде резервуара со льдом и вентилятора. Чтобы обеспечить охлаждающий эффект, воздух должен подаваться на рабочие места с помощью изолированных трубопроводов.

В 1982 году впервые было упомянуто намерение группы Rand Mines создать исследовательский проект для золотодобывающего рудника East Rand Proprietary Mines (ERPM) со льдом в качестве хладагента.

Физический принцип использования льда в качестве хладагента описывается следующим образом: лед имеет температуру плавления 334 кДж/кг а удельная теплоемкость воды 4,188 кДж/кг·К. Таким образом, тепло плавления так же велико, как тепло, с которым можно нагреть воду на 80 К. Если

предположить, что вода используется в воздушной системе охлаждения, при которой рассол нагревается в среднем на 20 К и что вода из растопленного льда также нагревается на 20 К, то можно сделать вывод, что лед может поглощать в пять раз больше тепла на единицу массы, по сравнению с водой.

Использование льда для контроля над температурой воздуха в рабочей зоне было изначально очень очевидной мерой, особенно если был доступен естественный лед. Использование льда для охлаждения воздуха осуществлялось в два этапа:

- на первом этапе воздух продувался через резервуар со льдом как можно ближе к рабочим точкам, что приводило охлаждению воздуха;
- на втором этапе лед использовался в качестве хладагента.

В настоящее время АХ на базе ЛС для нормализации тепловых условий на шахтах Донбасса не применяется, ввиду отсутствия современных технологий его применения для охлаждения воздуха. Разработка и внедрение холодильных установок использующих в качестве АХ ЛС позволит в будущем значительно сократить затраты на снижение температуры воздуха, соблюдая при этом ПБ.

Принимая во внимание стоимость, энергоемкость и затраты на обслуживание применяемых в настоящее время стационарных и передвижных холодильных машин, а также тот факт, что снижение температуры до требуемой ПБ средствами охлаждения практически невозможно, следует сделать вывод о актуальности задачи по разработке новых экономически целесообразных средств защиты горнорабочих от неблагоприятных условий труда по тепловому фактору.

Цель и задачи исследований

Анализ результатов проведенных исследований показывает, что способы улучшения условий труда горнорабочих, нормализацией температурного режима в локальной рабочей зоне при выполнении аварийно-восстановительных и ремонтных работах – изучены недостаточно и требуют доработки и корректировки. Следовательно, разработка специальных средств и способов

охлаждения воздуха при ведении ремонтных и аварийно-восстановительных работах, до безопасных для горнорабочих температур, является актуальной научно-технической задачей и требует своего решения. Это обусловило выбор темы диссертации и позволило сформулировать идею, цель и задачи работы.

В основу решения актуальной научно-технической задачи положена идея, заключающаяся в использовании особенностей хладагента на основе льдосолевой смеси, в условиях фазовых переходов льда при взаимодействии с движущейся струей воздуха, которые позволяют охлаждать воздушный поток в локальной рабочей зоне за счет эндотермических реакций гидратации соли в воде.

В соответствии с предложенной идеей работы сформулирована цель работы – нормализация температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки, путем охлаждения воздуха до температуры $t \leq 299,2$ К для создания безопасных условий труда горнорабочих.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) Выполнить анализ существующих способов и технических средств регулирования теплового режима в горных выработках и установить возможные направления совершенствования технических решений по охлаждению воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки;

2) Выполнить прогноз дальность подачи струи охлажденного воздуха в проветриваемую горную выработку, где обеспечивается температура воздуха $t \leq 299$ К, установить закономерности ее движения, а также исследовать процесс теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода;

3) Обосновать конструктивные и эксплуатационные параметры установки охлаждения воздуха, использующей хладагент на основе льдосолевой смеси.

РАЗДЕЛ 2

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ
ОХЛАЖДЕНИИ ВОЗДУХА ЛЬДОСОЛЯНОЙ СМЕСЬЮ2.1 Исследование теплопоглощения льдосоляной смесью при охлаждении
воздуха

Согласно «Правилам безопасности в угольных шахтах» допустимая температура воздуха в угольных шахтах не должна превышать 299 К. Однако, несмотря на принимаемые меры по нормализации температуры, она во многих случаях поднимается до 305 – 306 К, что приводит к перегреванию организма горнорабочего. При возникновении аварийных ситуаций еще больше усложняются условия пребывания людей в этих местах из-за воздействия теплового излучения.

Во время ведения аварийно-восстановительных и ремонтных работ возникает потребность снижения температуры рудничного воздуха в локальных рабочих зонах до величины допустимой ПБ в угольных шахтах. В ходе выполнении таких работ, как правило, искусственное охлаждение воздуха практически не применяется, вследствие чего на рабочих местах формируются крайне неблагоприятные условия для возможности терморегуляции организма, что приводит к тепловому истощению, перегреву тела и тепловому удару.

Перспективным и экономически целесообразным способом снижения температуры воздуха в локальных рабочих зонах горных выработок при ведении аварийно-восстановительных и ремонтных работ является применение установок охлаждения воздуха имеющих в своем арсенале аккумуляторы холода на основе льдосодержащих хладагентов [17].

Из работ профессора А.В. Брушкова известно, что снижение температуры замерзания (плавления) растворов достигается путем ввода соли в их состав. При замораживании эвтектического водного раствора некоторых солей получают эвтектический лед, который имеет постоянную низкую температуру,

соответствующую криогидратной точке. Криогидратной точке соответствует эвтектическая концентрация соли. Такая смесь называется эвтектиком.

Наибольшее распространение имеет эвтектический лед из раствора поваренной соли (NaCl), температура плавления такого льда — 251,9 К, а теплота плавления 236 кДж/кг (таблица 2.1.).

В ходе проведения теоретических исследований тепловых процессов при охлаждении воздуха льдосоляной смесью (далее ЛС) будем рассматривать эвтектический лед из раствора поваренной NaCl.

Таблица 2.1.
Температура замерзания (плавления) водных растворов хлорида натрия

Содержание соли NaCl в растворе, % по массе	Температура замерзания (плавления), К	Содержание соли NaCl в растворе, % по массе	Температура замерзания (плавления), К
0,1	273,3	16,2	260,9
1,5	272,3	17,5	259,6
2,9	271,4	18,8	258,1
4,3	270,6	20,0	256,6
5,6	269,7	21,2	254,9
7,0	268,8	22,4	253,2
8,3	267,8	23,1	251,9
9,6	266,8	23,7	255,9
11,6	265,7	24,9	263,6
12,3	264,6	26,1	271,5
13,6	263,4	26,3	273,2
14,9	262,2		

Расчет параметров любой системы охлаждения, в том числе определение количества аккумуляторов холода (далее АХ) выполняются в зависимости от необходимой производительности (объема охлаждаемого воздуха) и длительности цикла ее работы. Под циклом работы следует понимать длительность функционирования системы охлаждения с момента ее пуска до достижения в охлаждаемой рабочей зоне температуры ≤ 299 К.

Все процессы теплообмена необходимо начинать с рассмотрения процесса фазового перехода ЛС. Так как каждую ячейку АХ можно представить в виде трубки некоторой длины (рисунок 2.1).

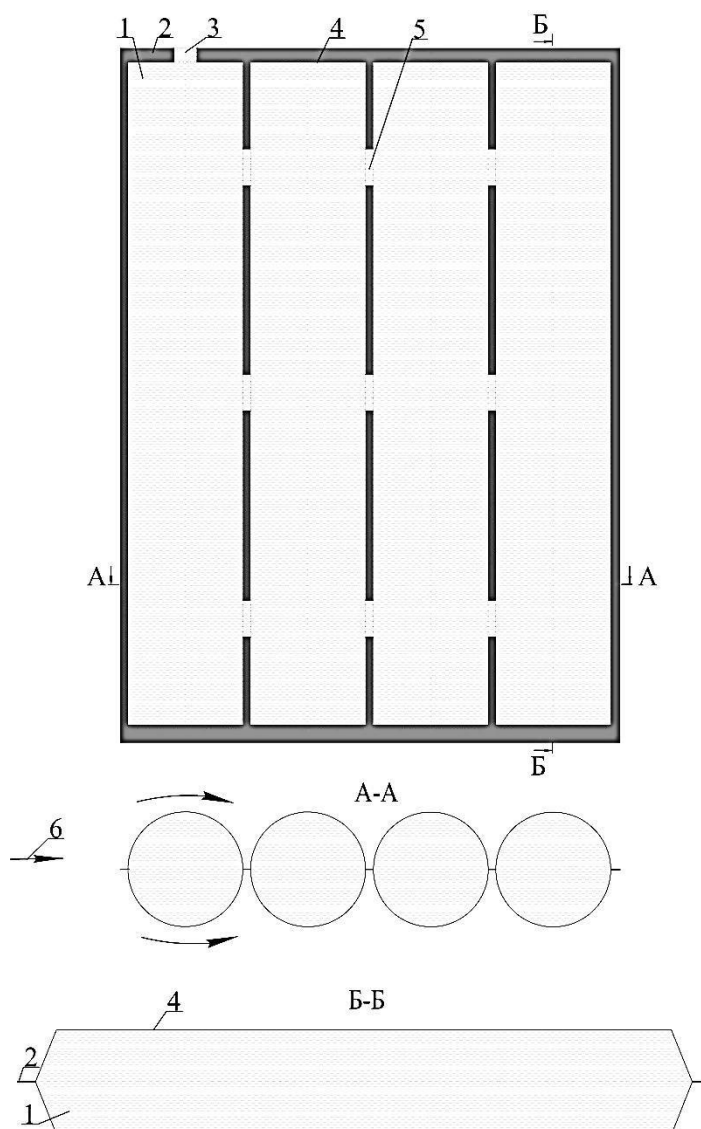


Рисунок 2.1 – Схема аккумулятора холода:
 1 – рассол; 2 – полиэтиленовый шов; 3 – заливное отверстие;
 4 – ячейка аккумулятора холода; 5 – проход для рассола; 6 – направление движения воздуха вдоль аккумулятора холода.

Динамику температуры в АХ будем описывать уравнением в цилиндрической системе координат [17 с. 53]

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), \quad (2.1)$$

где θ – температура ЛС, К;

τ – время, с;

x – продольная координата вдоль ячейки АХ, м;

r – радиус в поперечном сечении ячейки АХ, м;

a – коэффициент температуропроводности внутри ячейки АХ, м²/с.

Кроме того, будем считать [18], что изменение массы твердого вещества при плавлении ЛС пропорционально самой его массе:

$$\frac{dM}{d\tau} = -km, \quad (2.3)$$

где m – масса ЛС, кг/м³;

k – константа скорости плавления льда, 1/с;

τ – время, с.

Интегрируя уравнение (2.3) при начальной массе ЛС, равной $m(0) = m_0$, получим

$$m = m_0 \exp[-k\tau]. \quad (2.4)$$

Константу скорости плавления ЛС в зависимости от температуры представим соотношением

$$k = A \exp\left(\frac{-E_A}{C_p T}\right), \quad (2.5)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, 1/с;

E_A – энергия плавления ЛС, Дж/моль;

C_p – удельная изобарная теплоемкость ЛС, Дж/(К · моль).

Подставляя формулу (2.5) в решение (2.4), будем иметь

$$m = m_0 \exp\left[-A \exp\left(\frac{-E_A}{C_p T}\right) \tau\right]. \quad (2.6)$$

Такой подход дает возможность выразить зависимость процесса плавления ЛС от температуры.

Пред-экспоненциальный множитель A , входящий в формулу (2.5), является заранее неизвестной величиной, но его можно определить, зная период плавления ЛС наполовину.

На рисунке 2.2 построена кривая фазового перехода льдосоляной смеси от времени с начала ее плавления, найденная при константе скорости плавления, $k = 4 \cdot 10^{-4} \text{ 1/с}$.

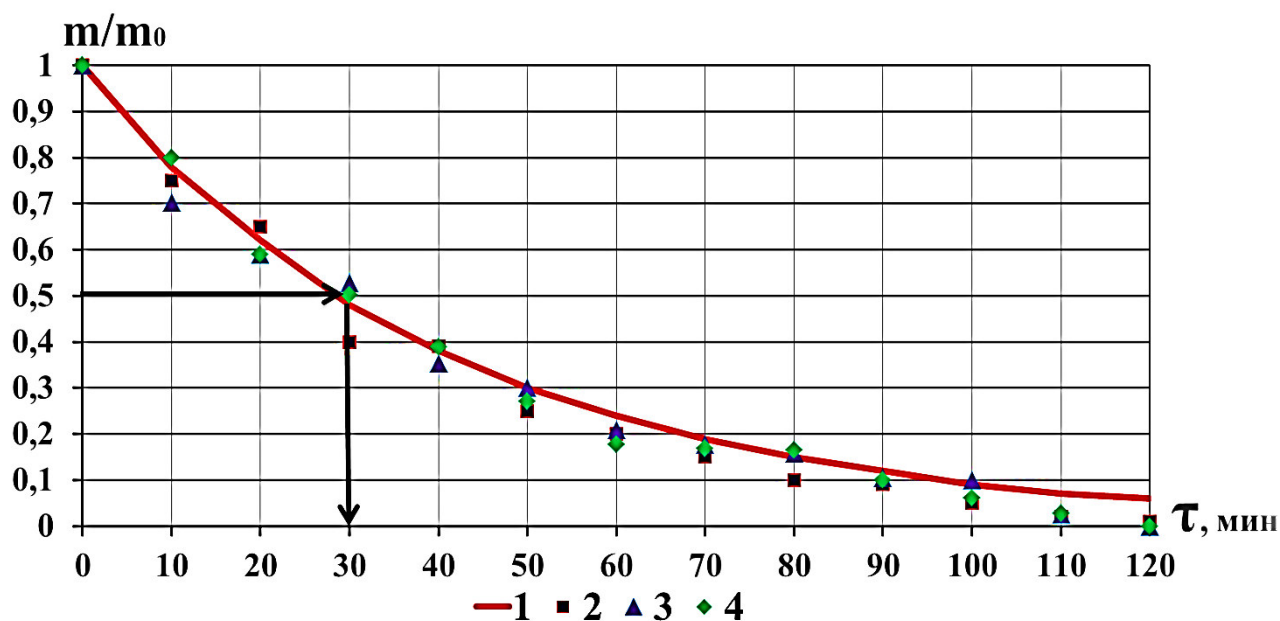


Рисунок 2.2 – Кривая фазового перехода льдосоляной смеси от времени с начала ее плавления:

1 – расчетные данные; 2,3,4 – экспериментальные данные.

Полученные результаты позволяют использовать их в УОВ. Испытания УОВ производились на базе специализированной лаборатории кафедры «Охрана труда и аэрология» ГОУВПО «ДОННТУ». Основной целью лабораторных испытаний является проверка работоспособности УОВ, а также установление ее производительности и определения зоны защитного действия. Эксперименты проводились на модельном образце УОВ, состоящей из теплоизолированного корпуса, разделенного по вертикали на три отсека, где на полках размещены АХ. Движение воздуха в теплообменных камерах УОВ обеспечивается вентилятором

местного проветривания. Охлаждение воздуха происходит за счет омывания АХ размещенных в теплообменных камерах. Поскольку АХ размещаются на перфорированных полках, их омывание воздухом происходит со всех сторон, что повышает интенсивность теплосъема. Заморозка АХ осуществляется в морозильных камерах. При полной заморозке температура АХ составляет 252,2 К.

В ходе ведения экспериментальных исследований контролировалась температура воздуха на входе в УОВ, на выходе из нее, на расстоянии трех и шести метров по ходу движения воздушной струи, а также скорость движения воздуха на выходе из вентиляционного трубопровода УОВ и в лаборатории.

Большой интерес представляет поведение струи воздуха за пределами УОВ. Струя воздуха называется затопленной, если она распространяется в среде с теми же физическими свойствами, что и у нее самой. При изучении движения воздуха в системах вентиляции встречаются различные случаи распространения затопленных струй. Но при рассмотрении этих случаев в качестве исходной используется схема свободной струи. Свободная струя - это струя, распространяющаяся в безграничной среде (струя, не ограниченная твердыми стенками). Струя при этом может истекать в неподвижную среду, а так же в поток воздуха.

В данном случае различают:

- спутную струю, струя, истекающая в поток, направление скорости которого совпадает с направлением струи;
- струю в сносящем потоке, если скорость потока направлена под углом к оси струи;
- струю во встречном потоке, когда векторы продольной скорости струи и скорости потока направлены навстречу друг другу.

При изучении поведения струи воздуха, исходящей из УОВ и попадающей в спутный поток воздуха в горной выработке, необходимо знать дальность ее распространения, площадь покрытия, а также температуру в конце пути.

2.2 Разработка математической модели теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода в процессе охлаждения воздуха

Анализ результатов исследований [19, 20] показывает, что теплообменные процессы в АХ рассматриваются в поперечных их сечениях, но не по длине, хотя в ряде случаев это крайне необходимо.

С целью определения холодопроизводительности УОВ необходимо разработать математическую модель процессов теплообмена воздушной струи при контакте с АХ как по длине, так и в поперечных сечениях.

Функция интенсивности тепловыделения должна включаться в уравнение конвективно-диффузионного переноса тепла в условно цилиндрическом канале, которое имеет вид [21,22]

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \rho c_p q, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

T – температура, К;

q – интенсивность источника тепловыделения, К /с;

u – продольная скорость воздуха, м/с;

x – продольная, вдоль канала, координата, м;

r – поперечная координата от центра симметрии сечения канала, м.

На рисунке 2.3 приведена схема привязки системы координат к натурному объекту (к УОВ). На рисунке стрелкой указано направление движения потока воздуха.

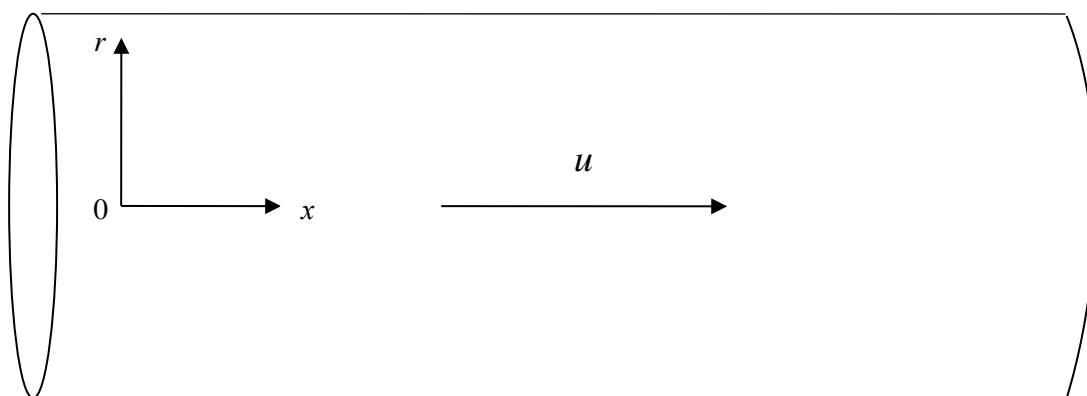


Рисунок 2.3 – Схема привязки системы координат к натурному объекту

Преобразуем уравнение (2.7) к виду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + q, \quad (2.8)$$

где $a_1 = \lambda_1 / (\rho c_p)$ – коэффициент температуропроводности воздуха, м²/с.

К уравнению (2.8) необходимо добавить уравнение теплопроводности за пределами канала, аналогичное уравнению (2.8), но без конвективного переноса и без источников тепла

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right), \quad (2.9)$$

где θ – температура за пределами канала, К;

a_2 – коэффициент температуропроводности окружающего массива, м²/с.

Для упрощения задачи будем рассматривать среднюю по поперечному сечению канала температуру воздуха. С этой целью проинтегрируем уравнение (2.8) по поперечному сечению канала, полагая

$$\tilde{T}(x, \tau) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R T(2\pi r) dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R T r dr, \quad (2.10)$$

где R – радиус канала, м.

Преобразуем уравнение (2.8) к виду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + q. \quad (2.11)$$

Рассмотрим вид интеграла

$$\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr = \frac{2}{R} \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial r}, \quad (2.12)$$

После интегрирования уравнения (2.11) по площади поперечного сечения канала с учетом формулы (2.12) получим

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \left[\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial r} \right] + q, \quad (2.13)$$

На контакте вентиляционного потока со стенками канала задаются обычно граничные условия четвертого рода, указывающие на то, что температура и тепловые источники на контакте канала с внешней средой должны быть равны:

$$1) \tilde{T}(x, R, \tau) = \theta(x, R, \tau); \quad 2) \lambda_1 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \lambda_2 \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=R}, \quad (2.14)$$

где λ_1 и λ_2 коэффициенты теплопроводности соответственно в потоке воздуха и за его пределами, Вт/(м·К).

Согласно [21 с. 46] можно принять, что при $r = R$ градиент температуры на стенке канала пропорционален разности температур:

$$\lambda_1 \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \Big|_{r=R} = \alpha_1 (\theta - T_{cm}), \quad (2.15)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи потока воздуха стенкам канала, Вт/(м²·К);
 T_{cm} – температура стенки, К.

Так как коэффициент температуропроводности равен $a_1 = \lambda_1/\rho c_p$, то с учетом выражения (2.15) приведем уравнение (2.13) к виду

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{2\alpha}{\rho c_p R} (\theta - T_{cm}) + q. \quad (2.16)$$

В уравнении (2.9) второе слагаемое в его правой части имеет порядок малости намного меньше, чем третье слагаемое и поэтому вместо (2.9) получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right). \quad (2.17)$$

Поскольку прогрев стенок канала происходит на незначительную глубину, то уравнение (2.17) еще больше упрощается и принимает вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2}. \quad (2.18)$$

Представим уравнение (2.18) в конечных разностях по радиусу и получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_2}{\Delta r^2} (\theta_1 - 2\theta + T_{cm}). \quad (2.19)$$

Примем за пределами канала условие непроницаемости теплового потока:
 $\theta_1 = \theta$, а температуру на стенке равной

$$T_{cm} = (\tilde{T} + \theta) / 2, \quad (2.20)$$

и представим уравнение (2.19) в виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_2}{2\Delta r^2} (\tilde{T} - \theta). \quad (2.21)$$

Тогда при $q = 0$ упростится и уравнение (2.16) и примет вид

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + b(\theta - \tilde{T}), \quad (2.22)$$

где коэффициент теплообмена $b = \frac{2\alpha}{\rho c_p R}$, 1/с.

Температура в АХ до момента полного фазового перехода ЛС остается неизменной, а затем, после полного плавления ЛС, начинать увеличиваться. Поэтому примем при плавлении ЛС

$$\theta = T_1, \text{ если } \tau < \tau_1, \quad (2.23)$$

где T_1 – температура ЛС, К;

τ_1 , - время плавления (фазового перехода) ЛС, с.

После плавления ЛС в рассоле будут происходить процессы теплообмена с воздухом по закону

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b(T - \theta), \quad (2.24)$$

В начальное время $\tau = 0$ в потоке воздуха везде температура будет равной начальной температуре $T = T_0$.

Рассол после плавления льда, реагируя с потоком воздуха, будет также поглощать тепло.

2.3 Исследования процессов теплообмена воздушного потока с аккумуляторами холода в теплообменных камерах установки

При исследовании процессов теплообмена воздушной струи при контакте с АХ используем уравнения (2.22) и (2.24) как систему:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b(\theta - T),$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b(T - \theta). \quad (2.25)$$

Из-за сложности системы уравнений (2.25) будем решать их численным методом, для чего выразим производные в конечных разностях

$$\frac{\Delta T}{\Delta \tau} + u \frac{\Delta T}{\Delta x} = a_1 \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + b(\theta - T),$$

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta x^2} + b(T - \theta). \quad (2.26)$$

Раскрывая выражения для приращений температуры вместо (2.26), получим

$$\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta \tau} = \frac{u}{\Delta x} (T_{m-1,n} - T_{m,n}) + a_1 \left(\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b(\theta_{m,n} - T_{m,n}),$$

$$\frac{\theta_{m,n+1} - \theta_{m,n}}{\Delta \tau} = a \left(\frac{\theta_{m-1,n} - 2\theta_{m,n} + \theta_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b(T_{m,n} - \theta_{m,n}), \quad (2.27)$$

где m - номер узла сетки при условном разбиении отрезка в направлении по длине УОВ;

n - номер узла по времени.

На рисунке 2.4 представлено условное разбиение на отрезки.

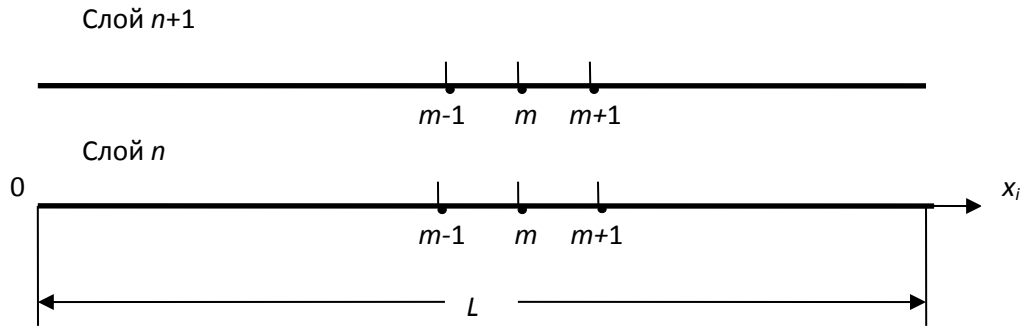


Рисунок 2.4 – Номера узлов по длине УОВ и по времени

Разрешим уравнения (2.27) относительно искомых величин и получим

$$T_{m,n+1} = T_{m,n} + \frac{u\Delta\tau}{\Delta x} (T_{m-1,n} - T_{m,n}) + a_1\Delta\tau \left(\frac{\bar{T}_{m-1,n} - 2\bar{T}_{m,n} + \bar{T}_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b\Delta\tau (\theta_{m,n} - T_{m,n}),$$

$$\theta_{m,n+1} = \theta_{m,n} + a\Delta\tau \left(\frac{\theta_{m-1,n} - 2\theta_{m,n} + \theta_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b\Delta\tau (T_{m,n} - \theta_{m,n}). \quad (2.28)$$

Принимая $a_1 = a$, преобразуем систему уравнений (2.28) к более удобному для расчетов виду

$$T_{m,n+1} = \left(\frac{u\Delta\tau}{\Delta x} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \right) T_{m-1,n} + \left(1 - \frac{u\Delta\tau}{\Delta x} - 2\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} - b\Delta\tau \right) T_{m,n} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} T_{m+1,n} + b\Delta\tau \theta_{m,n},$$

$$\theta_{m,n+1} = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \theta_{m-1,n} + \left(1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2} - b\Delta\tau \right) \theta_{m,n} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \theta_{m+1,n} + b\Delta\tau T_{m,n}. \quad (2.29)$$

Для расчетов могут быть использованы как формулы системы уравнений (2.28), так и формулы (2.29), однако удобство формул (2.29) в том, что они содержат три слагаемых относительно температур слева, в центре и справа.

Приняв скорость газовой смеси постоянной, представим полученные уравнения (2.29) в критериальном виде

$$\begin{aligned} T_{m,n+1} &= (Cu + Fo)T_{m-1,n} + (1 - Cu - 2Fo - \gamma)T_{m,n} + FoT_{m+1,n} + \gamma\theta_{m,n}, \\ \theta_{m,n+1} &= Fo\theta_{m-1,n} + (1 - 2Fo - \gamma)\theta_{m,n} + Fo\theta_{m+1,n} + \gamma T_{m,n}, \end{aligned} \quad (2.30)$$

где $Cu = u\Delta t / \Delta x$ – критерий моделирования Куранта;

$Fo = D_x \Delta t / \Delta x^2$ – диффузионный критерий Фурье;

$\gamma = b\Delta t$ – безразмерный параметр интенсивности теплообмена со стенками канала.

Очевидно, для устойчивого счета по формулам (2.30) необходимо потребовать, чтобы

$$Cu + 2Fo + \gamma < 1.$$

Действительно, если не соблюдать это условие, то температура может принять отрицательные значения, что не соответствует действительности.

Начальными условиями для уравнений системы (2.30) будут условия

$$T_{m,0} = T_0; \theta_{m,0} = T_1, \quad (2.31)$$

где T_0 – температура нагретого воздуха до охлаждения, К;

T_1 – температура ЛС, К.

Граничными условиями для уравнений (2.30) будут условия

$$\bar{T}_{0,n} = 1; \quad T_{M,n} = T_{M-1,n}, \quad (2.32)$$

где M – номер узла на выходе воздуха из УОВ.

На рисунке 2.5 приведена схема движения воздуха в УОВ.

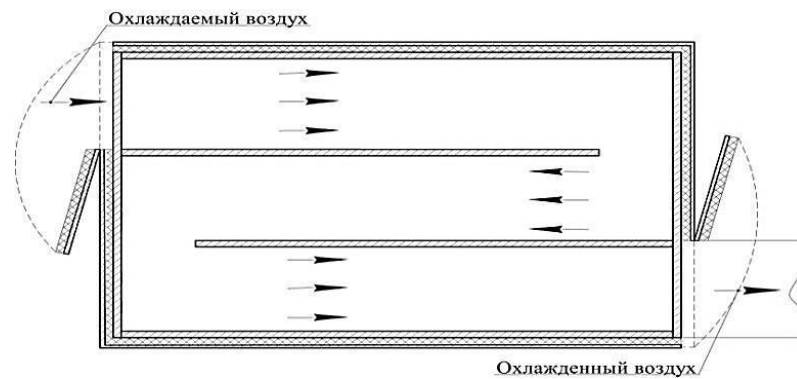


Рисунок 2.5 – Схема движения воздуха в установке охлаждения воздуха

Здесь при расчетах необходимо принимать на поворотах воздуха коэффициент теплообмена $\gamma = 0$, так как в этих местах будут отсутствовать АХ.

На рисунке 2.6 представлены результаты расчета по первой формуле (2.30) распределения температуры вдоль УОВ при заданных коэффициентах для нетающей ЛС.

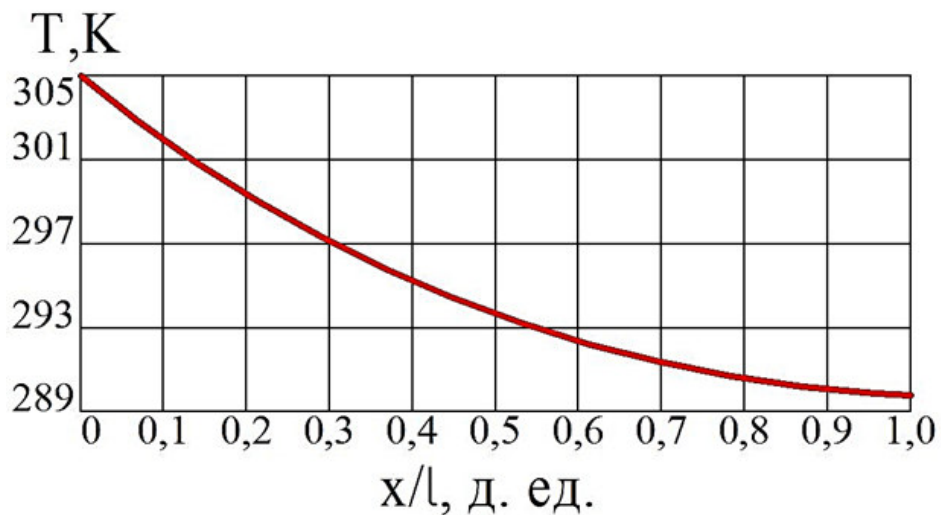


Рисунок.2.6 – Распределение температуры в УОВ по ее длине

Как видно (рисунок 2.6), при коэффициентах первой формулы (2.29), равных

$$Cu = 0,5; Fo = 0,1; \gamma = 0,3, \quad (2.33)$$

после охлаждения воздух от температуры 305 К постепенно снижается до температуры 290 К. Таким образом, разработанная математическая модель процесса теплообмена воздушной струи при контакте с АХ дает возможность исследовать процесс охлаждения воздуха в УОВ.

2.4 Исследования подачи охлажденной воздушной струи в проветриваемую горную выработку для образования локальной рабочей зоны с нормативной температурой воздуха

При истечении из вентиляционный трубопровод установки охлажденной струи с большой скоростью она попадает в спутный поток нагретого воздуха и постепенно смешивается с ним. Схема их перемешивания изображена на рисунке 2.7.

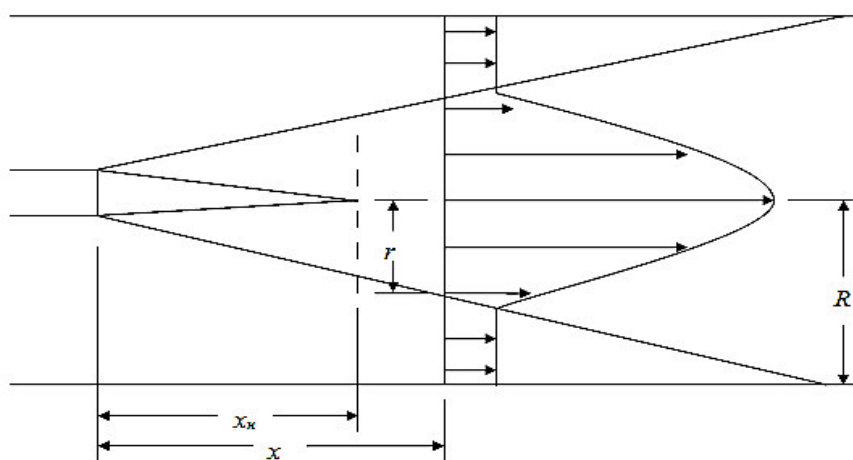


Рисунок 2.7 – Схема течения охлажденного воздуха на выходе из УОВ и его перемешивания с нагретым потоком воздуха в горной выработке:
 r – радиус струи в зависимости от расстояния до трубопровода; x – расстояние от конца трубы по ходу движения струи; x_n – длина начального участка; R – текущий радиус поперечного сечения струи.

Часть струи, как показано на рисунке 2.7, имеет ядро течения с постоянной скоростью от окончания трубопровода до полного разрушения ядра и называется начальным участком x_n .

Размывание струи за пределами начального участка ($x > x_n$) приводит к ее утолщению и падению скорости вдоль оси. Такой участок струи является основным.

Для установления дальнобойности и закономерностей распада струй охлажденного воздуха будем исходить из теории движения газожидкостных систем [23,24]. На основании общих представлений и известных экспериментальных данных [25], схему движения и распада воздушной струи можно изобразить в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

Будем считать, что до распада струи можно пренебречь силами гравитации, благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтем, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения холодной струи с нагретым воздухом, но и бокового трения струи о воздух.

Тогда при отсутствии фазовых превращений уравнение нестационарного относительного движения одиночной струи можно представить в виде

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -(\lambda S_6 + \zeta S) \rho_0 \frac{w^2}{2V}, \quad (2.34)$$

где ρ – переменная плотность воздуха, кг/м³;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³;

w – продольная скорость движения воздушной струи, м/с;

τ – время с момента вылета холодной струи воздуха из УОВ, с;

λ – коэффициент бокового трения воздушной струи о воздух в выработке, 1;

ζ – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, 1;

S_6 – площадь боковой поверхности воздушной струи, м²;

S – площадь поперечного сечения воздушной струи в головной ее части, м²;

V – объем охлажденного воздуха на участке действия воздушной струи, м³.

Уравнение (2.34) предназначено для определения изменения скорости движения холодной струи при начальном условии

$$w(0) = w_0, \quad (2.35)$$

где w_0 – начальная скорость истечения воздушной струи из вентиляционный трубопровод УОВ, м/с.

Для получения аналитического решения задачи будем считать все параметры, входящие в уравнение (2.34), заранее известными величинами, за исключением искомой функции скорости w .

Так как объем воздушной струи равен $V = \pi L d^2 / 4$, а боковая поверхность струи $S_6 = \pi L d$, то их отношение можно представить как $S_6 / V = 4 / d$. Подставляя эту формулу в уравнение (2.34) и пренебрегая лобовым сопротивлением по сравнению с боковым сопротивлением, вместо (2.34) получим

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -2\lambda \rho_0 \frac{w^2}{d}, \quad (2.36)$$

где d – диаметр воздушной струи, м.

Принимая $\rho = \rho_0$, разделим переменные в уравнении (2.36) и получим

$$\frac{dw}{w^2} = -2\lambda d\tau / d, \quad (2.37)$$

Решение уравнения (2.37) имеет вид

$$\frac{1}{w} = -2\lambda \tau / d + A, \quad (2.38)$$

где $A = 1/w_0$ – константа интегрирования, с/м.

Подставляя значение константы интегрирования в формулу (2.38), получим

$$w = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau/d}, \quad (2.39)$$

где безразмерный коэффициент $C = 2 \lambda$.

Анализ полученного решения (2.39) показывает, что скорость движения воздушной струи будет уменьшаться по сравнению с начальным ее значением.

Для определения дальнобойности x холодной струи воздуха используем зависимость (2.39) и после интегрирования получим

$$x = \int_0^{\tau} w(\tau) d\tau = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau/d). \quad (2.40)$$

Из анализа полученной зависимости следует, что дальнобойность холодной струи воздуха в большой степени зависит от ее начальной скорости и от диаметра выходного отверстия вентиляционного трубопровода УОВ.

При больших скоростях движения воздушной струи возникающая разность давлений в лобовой и кормовой частях струи стремится ее деформировать и сжать. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи с течением времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания воздушной струи, приводящие, как отмечается в работе [26], к ее распаду. Взаимодействие охлажденного воздуха с окружающим нагретым воздухом на границе их раздела можно описать уравнением вида

$$2\mu \frac{dR}{d\tau} = R \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right], \quad (2.41)$$

где μ – коэффициент турбулентной динамической вязкости охлажденного воздуха на границе контакта с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

R – текущий радиус поперечного сечения струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения холодной струи, Па·м;

R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны головной части воздушной струи, м.

Из уравнения (2.41) следует, что изменения радиуса поперечного сечения струи происходят в результате аэродинамического сопротивления движению, которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому динамическому воздействию на струю противостоит сила поверхностного натяжения струи [27].

Определим главные радиусы кривизны холодной струи воздуха для сильно вытянутого эллипсоида. В этом случае главные радиусы кривизны в направлении движения струи R_1 и поперек ее движению R_2 соответственно определяются по формулам [28]

$$R_1 = \frac{2R^2}{L}; \quad R_2 = \frac{L^2}{4R}, \quad (2.42)$$

где L – длина воздушной струи до распада, м.

Так как объем струи равен $V = \pi R^2 L$, откуда длина струи $L = \frac{V}{\pi R^2}$, то подставляя это выражение в формулы (2.42), получим

$$R_1 = \frac{2\pi R^4}{V}; \quad R_2 = \frac{V^2}{4\pi^2 R^5}. \quad (2.43)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения воздушной струи $S = \pi R^2$, то вместо уравнения (2.41) будем иметь

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2} \right) \right]. \quad (2.44)$$

Анализ полученного уравнения (2.44) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части охлажденной воздушной струи будет тем больше, чем меньше турбулентная вязкость воздуха [29]. При большой вязкости головная часть струи при движении почти не изменит своей формы. В то же время при малой вязкости воздуха форма струи будет сильно меняться, и в установившемся режиме каждой скорости будет соответствовать своя форма струи [30]. Предположим, что до распада воздушной струи ее длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($R_1 \gg R_2$). Тогда уравнение (2.44) можно упростить и представить в виде

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (2.45)$$

Этому уравнению эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{d\tau} = A(\tau)S - B, \quad (2.46)$$

коэффициенты которого равны

$$A(\tau) = \zeta \rho \frac{w^2}{2\mu}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu}. \quad (2.47)$$

Общее решение уравнения (2.46) с начальным условием $S(0) = S_0$ представим в виде

$$S = \exp \left(\int A(\tau) d\tau \right) \left[S_0 - B \int_0^{\tau} \exp \left(- \int A(\tau) d\tau \right) d\tau \right]. \quad (2.48)$$

В первом приближении, полагая

$$A(0) = A_0 = \zeta \rho \frac{w_0^2}{2\mu}, \quad (2.49)$$

вместо решения (2.48) получим

$$S(\tau) = \exp(A_0\tau) \left\{ S_0 - \frac{B}{A_0} [1 - \exp(-A_0\tau)] \right\}. \quad (2.50)$$

Можно образовать безразмерный критериальный комплекс для моделирования динамики воздушной струи [31]. Так, можно принять

$$E_1 = \frac{B}{A_0 S_0}. \quad (2.51)$$

С помощью (2.51) упростим вид уравнения (2.50) и придадим ему вид

$$\bar{S} = \frac{S(\tau)}{S_0} = E_1 + (1 - E_1) \exp(A_0\tau). \quad (2.52)$$

При полной деформации воздушной струи и больших ее колебаниях происходит окончательный ее распад [32]. Будем считать, что распад воздушной струи происходит тогда, когда площадь ее поперечного сечения достигает максимально возможного значения. Это значение можно вычислить, полагая радиус боковой кривизны намного меньше радиуса фронтальной кривизны ($R_2 \ll R_1$). Тогда при равновесии сил кинетической энергии струи и сил поверхностного натяжения из уравнения (2.45) получим

$$\lambda \rho \frac{w_0^2}{2} = \sigma \frac{4S_m^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2}, \quad (2.53)$$

откуда найдем максимально возможную площадь $S_1 = S_m$ поперечного сечения воздушной струи

$$S_1 = \left[\pi^{0,5} \lambda \rho \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0,4}. \quad (2.54)$$

Для определения максимальной площади поперечного сечения струи формулу (2.54) преобразуем к виду

$$S_m = (a w_0 V)^{0,8}, \quad (2.55)$$

где a – эмпирическая константа, $\text{с/м}^{1,5}$.

Так как объем струи охлажденного воздуха равняется $V = S_0 l$, а скорость ее истечения, выраженная через расход, $w_0 = G / (\rho S_0)$, то вместо формулы (2.55) получим

$$S_m = \left(\frac{a G l}{\rho} \right)^{0,8}, \quad (2.56)$$

где a – эмпирическая константа, $\text{с/м}^{1,5}$;

G – расход струи охлажденного воздуха на один квадратный метре, $\text{кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$;

ρ – плотность охлажденного воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$;

l – длина охлажденной воздушной струи до распада, м.

При сплошной струе для определения ее расхода на один квадратный метр может использоваться формула [33]

$$\tilde{G} = \frac{G}{S_m}, \quad (2.57)$$

где \tilde{G} – расход струи охлажденного воздуха на один квадратный метре, кг/(с·м²).

При распыленной струе для определения ее расхода на один квадратный метр может использоваться формула

$$\tilde{G}_p = \frac{G}{\pi \left[x \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi \alpha}{360} \right) \right]^2}, \quad (2.58)$$

где \tilde{G}_p – расход распыленной струи на один квадратный метр, кг/(с·м²);

x – расстояние от вентиляционный трубопровод УОВ, м.

Максимальной площади поперечного сечения струи должно соответствовать определенное время распада струи и ее скорость [34]. Так, из выражения (2.48) найдем время распада охлажденной струи воздуха τ_m , по формуле

$$\tau_m = \frac{1}{A_0} \ln \left(\frac{S_1 - B/A_0}{S_0 - B/A_0} \right), \quad (2.59)$$

и критическую скорость распада w_1 , м/с, по формуле

$$w_1 = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau_m/d}. \quad (2.60)$$

Для расчета дальнотойности сплошной части струи охлажденного воздуха используем формулу (2.40) и получим

$$x_m = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau_m/d). \quad (2.61)$$

Таким образом, можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи воздуха, а также ее дальность.

Для описания профилей скорости воздуха в струйном турбулентном потоке воспользуемся данными, полученными ранее и подтвержденными экспериментально [35]. Так, установлено, что длина начального участка равняется примерно десяти радиусам на выходе из вентиляционного трубопровода УОВ. Поэтому практический интерес представляет основной участок струи.

На основном участке профиль скорости струи может быть описан зависимостью вида

$$w = w_1 + (w_m - w_0)[1 - (y/r)^{3/2}]^2, \quad (2.62)$$

где w_0 – скорость воздуха в горной выработке, м/с;

w_1 – скорость истечения струи из вентиляционный трубопровод, м/с;

w_m – скорость на оси воздушной струи, м/с;

y – расстояние от оси струи перпендикулярно потоку, м;

r – радиус струи в зависимости от расстояния до трубопровода, м.

Установлено, что в поперечных сечениях основного участка струи справедлива зависимость избыточной температуры от избыточной скорости

$$\frac{T - T_1}{T_m - T_1} = \left(\frac{w - w_0}{w_m - w_0} \right)^{0.8}, \quad (2.63)$$

где T – температура воздуха на расстоянии r от вентиляционного трубопровода УОВ, К;

T_1 – температура в спутном воздушном потоке, К;

T_m – температура на оси струи, К.

Радиус на основном участке осесимметричной струи или ее полутолщина является линейной функцией от расстояния до начального участка [36]

$$r = 2,73r_0 + \frac{w_1 - w_0}{w_1 + w_0} k(x - x_n), \quad (2.64)$$

где r_0 – радиус выхода вентиляционный трубопровод УОВ, м;

k – эмпирическая константа (для основного участка $k = 0,22$);

x_n – длина начального участка, м;

x – расстояние от конца трубы по ходу движения струи, м.

Если скорость на оси струи на начальном участке постоянна, то на основном участке она меняется обратно пропорционально радиусу струи

$$w_m = 2,73w_1 \frac{r_0}{r}. \quad (2.65)$$

Подставляя в формулу (2.65) выражение (2.64), получим

$$w_m = \frac{2,73w_0}{2,73 + \frac{w_0 - w_1}{w_0 + w_1} k(x / r_0 - 10)}. \quad (2.66)$$

В соответствии с экспериментальными данными принято $x \geq x_n = 10r_0$.

Таким образом, общая схема расчета такова. Задавшись расстоянием до места соприкосновения струи охлажденного воздуха со стенками выработки, определяем по формуле (2.66) скорость на оси струи при известной скорости основного потока воздуха и скорости истечения струи охлажденного воздуха, а также при $k = 0,22$ и заданном радиусе вентиляционный трубопровод.

Далее струя охлажденного воздуха, полностью смешавшись со спутным потоком воздуха, переносится дальше. При этом, благодаря турбулентному

режиму движения воздуха и хаотической пульсации скорости во всех направлениях происходит перемешивание нагретой воздушной струи с охлажденным воздухом.

На рисунке 2.8 по данным расчета по формуле (2.52) для произвольно выбранного значения $E_1 = 0,9$ определена форма головной части струи.

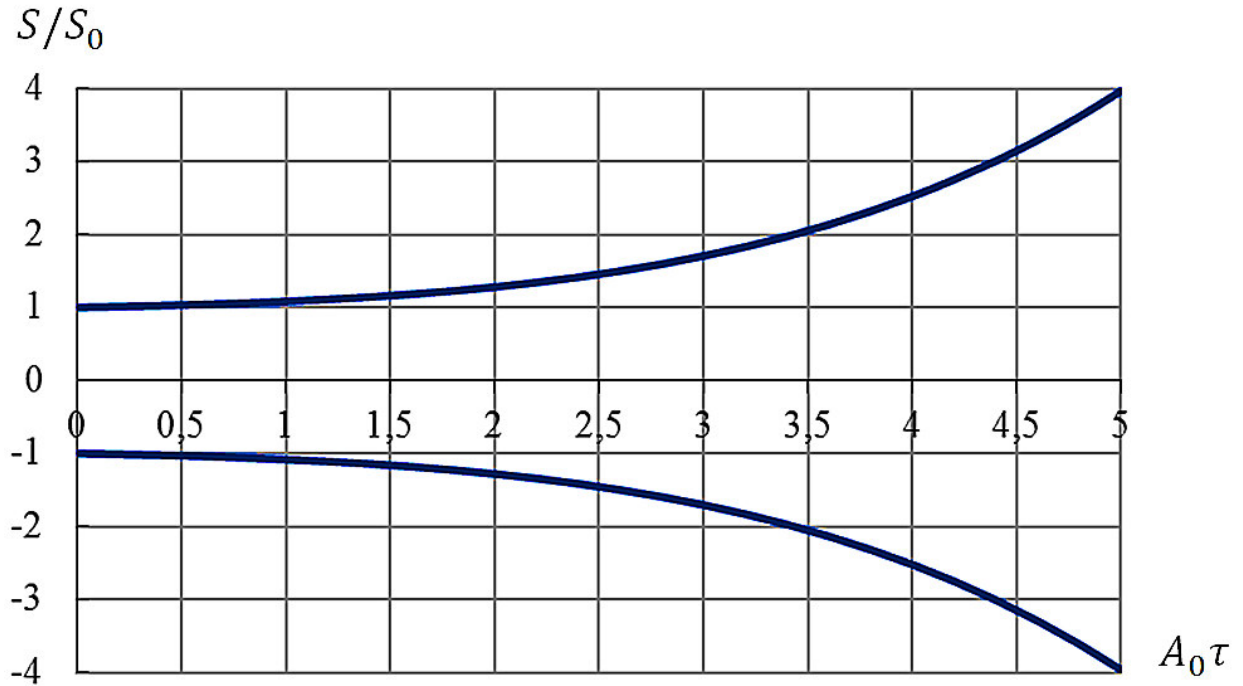


Рисунок 2.8 – Характер изменения формы головной части струи охлажденного воздуха

Из рисунка 2.8 видно, что в начале движения струя почти не деформируется, а затем головная ее часть существенно расширяется.

При отсутствии данных о начальной скорости движения струи ее можно установить по данным о перепаде давлений на выходе из УОВ ΔP , Па.

Расход струи охлажденного воздуха на выходе из УОВ G , кг/с, подчиняется параболической зависимости [37]

$$G = B\varphi F \sqrt{\rho_1 \Delta P}, \quad (2.67)$$

где B – коэффициент истечения ($B \approx 4$), 1;

φ – коэффициент скорости, близкий к единице, 1;

ΔP – перепад давлений на выходе из вентиляционный трубопровод УОВ, Па.

Так как расход струи охлажденного воздуха $G = \rho_1 w_0 F$, то вместо формулы (2.62) получим

$$w_0 = B\varphi \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_1}}. \quad (2.68)$$

Подставляя зависимость (2.63) в (2.61), можно при $\tau = \tau_m$ определять дальность сплошной части струи по формуле

$$x_m = \frac{d}{C} \ln \left(1 + CB\varphi \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_1}} \tau_m / d \right). \quad (2.69)$$

Таким образом, с достаточной степенью точности можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи охлажденного воздуха, а также ее дальности, исходя из теории движения газожидкостных систем.

Схема движения и распада сплошной струи, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается [38].

Как установлено, до распада струи можно пренебречь силами гравитации, благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтено, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения с воздухом, но и бокового трения струи охлажденного воздуха о нагретый воздух спутного потока.

Определена форма головной части струи, меняющаяся во время движения струи охлажденного воздуха. Так, в начале движения струя почти не деформируется, а затем головная ее часть может существенно расширяться.

Таким образом, выполнены исследования динамики струй охлажденного воздуха и закономерностей их распада.

За пределами УОВ в потоке воздуха горной выработке может быть использовано уравнение теплообмена (2.22) в стационарном виде диффузионных процессов

$$u \frac{dT}{dx} = b(T_0 - T), \quad (2.70)$$

где T – температура на выходе из УОВ, К;

T_0 – температура в горной выработке (перед УОВ), К;

$u = u(x)$ – скорость охлажденного воздуха в рабочей зоне, м/с;

b – коэффициент теплообмена воздуха со стенками выработки, 1/с;

x – расстояние от УОВ по ходу движения струи охлажденного воздуха, м.

Начальное условие для уравнения (2.70) представим в виде

$$T(0) = T_1, \quad (2.71)$$

где T_1 – температура на выходе из УОВ, К.

Интегрируя уравнение (2.70) в общем виде, получим

$$\ln(T - T_0) = -b \int_0^x (1/u) dx, \quad (2.72)$$

откуда найдем формулу для расчета температуры на различных расстояниях от УОВ

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-b \int_0^x (1/u) dx\right). \quad (2.73)$$

При постоянной скорости воздуха за УОВ ($u = \text{const}$) формула (2.73) примет вид

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-\frac{b}{u} x\right). \quad (2.74)$$

где T – температура воздуха в рабочей зоне, К;
 T_0 – температура в горной выработке (перед УОВ), К;
 T_1 – температура на выходе из УОВ, К;
 $u = u(x)$ – скорость воздуха в рабочей зоне, м/с;
 b – коэффициент теплообмена воздуха со стенками выработки, 1/с;
 x – длина охлаждаемой рабочей зоны, м.

Полученная формула (2.74) позволяет определять, как меняется температура воздуха в охлаждаемой рабочей зоне (рисунок 3.15).

Выводы к разделу

1. Рассмотрены процессы фазового перехода ЛС в зависимости от температуры окружающего воздуха и начальной массы и температуре ЛС. Установлено, что вначале температура ЛС постоянна, а затем, по окончании фазового перехода, начнет возрастать, пока не сравняется с температурой окружающей среды. Полученные результаты позволяют использовать их в УОВ при расчете температуры охлажденного воздушного потока.

2. Установлена зависимость температуры воздуха при нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки по продольной оси охлажденной воздушной струи, от скоростей охлажденной струи воздуха и спутного воздушного потока, а также их начальных температур.

3. Установлены оптимальные соотношения льда и соли, их рабочей температуры и температуры воздуха на выходе из установки, а также время эффективного теплопоглощения в зависимости от скорости воздуха в установке, его температуры и массы льдосоляной смеси.

4. Установлено в результате численных экспериментов, что после охлаждения воздух от температуры 305 К постепенно снижается до температуры 290 К.

5. Результаты исследований вошли в «Методические рекомендации по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», разработанные в ГОУВПО «ДОННТУ» и согласованные с НИИГД «РЕСПИРАТОР» (Приложение Ж).

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ
ВОЗДУХА ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ
ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В НЕЙ

3.1 Разработка плана многофакторного эксперимента при исследовании охлаждения воздуха аккумуляторами холода в горной выработке

Основываясь на теоретические исследования в области снижения температуры рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок, и проведя несколько пробных экспериментов, было установлено, что при планировании эксперимента необходимо учитывать такие определяющие факторы, как расход воздуха через УОВ, количество АХ (площадь теплообменной поверхности) и температуру охлаждаемого воздушного потока [39,40].

В ходе испытаний геометрические параметры экспериментальной УОВ остаются не измененными. Объектом исследования в нашем случае будет являться температура исходящего из УОВ воздушного потока. Температура на выходе из УОВ будет зависеть от продолжительности контакта воздуха с АХ, температуры ЛС, а также температуры на входе в лаборатории, расхода воздуха через УОВ, а также количества АХ в ее теплообменных камерах.

Продолжительность контакта воздуха с АХ зависит от скорости воздуха в УОВ, поэтому первым фактором во время испытаний будет скорость воздушного потока. Температура АХ в ходе испытаний до момента полного фазового перехода льда будет находиться на одном уровне, после чего начнет возрастать пока не сравняется с температурой окружающей среды. Скорость возрастания температуры АХ зависит от температуры входящего в УОВ воздуха, его количества, а также от количества АХ, помещенных в ее теплообменные камеры. Поскольку температуру АХ в ходе испытаний поддерживать на одном уровне невозможно, она не может являться фактором. Количество АХ в экспериментальных испытаниях УОВ принимаем за второй фактор, поскольку в

пробных испытаниях было установлено, что количество АХ непосредственно оказывает влияние на температуру воздуха на выходе из УОВ. Третьим фактором в ходе испытаний принимаем температуру воздуха подаваемого в теплообменные камеры установки.

В таблице 3.1. приведено кодирование факторов.

Таблица 3.1.

Кодирование факторов

Уровень фактора	Темп. на входе в уст. z_1	Площадь теплообменной поверхности АХ, z_2	Скорость воздуха в установке, z_3	Код фактора
Интервал варьирования	2,88	5,76	0,82	
Верхний звездный	35,00	27,50	4,00	1,215
Верхний уровень	34,38	26,26	3,82	1
Нулевой уровень	31,50	20,50	3,00	+
Нижний уровень	28,62	14,74	2,18	-1
Нижний звездный	28,00	13,50	2,00	-1,215

Для каждого фактора принимаем основной уровень, интервал варьирования и зависимость кодированной переменной x_i от натуральной z_i .

Зависимость кодированной величины от натуральной представим выражениями [41]

$$x_1 = \frac{z_1 - 31.5}{2.88}; x_2 = \frac{z_2 - 20.5}{5.76}; x_3 = \frac{z_3 - 3.0}{0.82}, \quad (3.1)$$

Каждый опыт повторяется по два раза, но не подряд, а в случайной последовательности, чтобы избежать систематических ошибок. Выполнив замеры в каждом опыте, находим математическое ожидание \bar{y} .

Для перебора всех возможных сочетаний, определяющих факторов по известной методике [42,43], составляется матрица ортогонального планирования эксперимента второго порядка для k^3 таблица 3.2. Кодирование значений нижних и верхних уровней факторов будет соответственно -1 и +1. Нулевым фактором будет соответственно среднее значение фактора. Параметры ортогонального плана второго порядка равны: $\varphi \approx 0,73$; $d = 1,2154$.

Таблица 3.2.

Центральное композиционное ортогональное планирование второго порядка для k^3

Опыт	z_0	z_1	z_2	z_3	$z_1^2-11/15$	$z_2^2-11/15$	$z_3^2-11/15$	z_1z_2	z_1z_3	z_2z_3	\bar{y}
Планирование 2^3	1	-1	-1	-1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	1	1	1	19,4
	1	1	-1	-1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	-1	-1	1	24,7
	1	-1	1	-1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	-1	1	-1	16,6
	1	1	1	-1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	1	-1	-1	21,7
	1	-1	-1	1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	1	-1	-1	19,9
	1	1	-1	1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	-1	1	-1	24,9
	1	-1	1	1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	-1	-1	1	19,1
	1	1	1	1	0,2666667	0,2666667	0,2666667	1	1	1	23,7
Звездные точки	1	-1,2154117	0	0	0,7438922	-0,7333333	-0,7333333	0	0	0	18,5
	1	1,2154117	0	0	0,7438922	-0,7333333	-0,7333333	0	0	0	27,1
	1	0	-1,2154117	0	-0,7333333	0,7438922	-0,7333333	0	0	0	29,4
	1	0	1,2154117	0	-0,7333333	0,7438922	-0,7333333	0	0	0	20,6
	1	0	0	-1,2154117	-0,7333333	-0,7333333	0,7438922	0	0	0	18,3
	1	0	0	1,2154117	-0,7333333	-0,7333333	0,7438922	0	0	0	17,4
Нулевая точка	1	0	0	0	-0,7333333	-0,7333333	-0,7333333	0	0	0	24,7

\bar{y} – температура исходящего из УОВ воздушного потока, °С

Таблица 3.3.

Центральное композиционное ортогональное планирование второго порядка для k^3 (квадраты)

Опыт	z_0	z_1	z_2	z_3	$z_1^2-11/15$	$z_2^2-11/15$	$z_3^2-11/15$	z_1z_2	z_1z_3	z_2z_3
1	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
2	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
3	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
4	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
5	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
6	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
7	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
8	1	1	1	1	0,07111111	0,07111111	0,07111111	1	1	1
9	1	1,4772256	0	0	0,5533757	0,5377778	0,5377778	0	0	0
10	1	1,4772256	0	0	0,5533757	0,5377778	0,5377778	0	0	0
11	1	0	1,4772256	0	0,5377778	0,5533757	0,5377778	0	0	0
12	1	0	1,4772256	0	0,5377778	0,5533757	0,5377778	0	0	0
13	1	0	0	1,4772256	0,5377778	0,5377778	0,5533757	0	0	0
14	1	0	0	1,4772256	0,5377778	0,5377778	0,5533757	0	0	0
15	1	0	0	0	0,5377778	0,5377778	0,5377778	0	0	0
Сумма квадратов	15	10,954451	10,954451	10,954451	4,3645291	4,3645291	4,3645291	8	8	8

Считаем средние выборочные результатов для каждого эксперимента:

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{2}(y_1 + y_2) = 19,4, \quad (3,2)$$

аналогичные расчеты выполняем для всех строк таблицы 3.2.

Определяем значения коэффициентов уравнения регрессии согласно результатам опытов (табл. 3.2.) по формуле

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}}{\sum_{u=1}^n z_{iu}^2}. \quad (3.3)$$

Знаменатель в формуле (3.3) не зависит от результатов опытов, поэтому его можно вычислить заранее, что упрощает обработку результатов эксперимента (таблица 3.4.).

Таблица 3.4.

Значение $\sum_{u=1}^n z_{iu}^2$ для ортогонального плана второго порядка для k^3

Столбец в матрице планирования	Значение $\sum_{u=1}^n z_{iu}^2$ при ядре типа k^3
z_0	15
z_i	10.9544
z_y	8
$z_i^{2-\varphi}$	4.364

Пользуясь формулой (3.3) и данными таблиц 3.2. и 3.4. определим значения коэффициентов регрессии

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}}{15}, \quad (3.4)$$

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n z_{1u} \bar{y}}{10.9544}, \quad (3.5)$$

$$b_2 = \frac{\sum_{i=1}^n z_{2u}\bar{y}}{10.9544}, \quad (3.6)$$

$$b_3 = \frac{\sum_{i=1}^n z_{3u}\bar{y}}{10.9544}, \quad (3.7)$$

$$b_{11} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{1u}^2\bar{y}}{4.364}, \quad (3.8)$$

$$b_{22} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{2u}^2\bar{y}}{4.364}, \quad (3.9)$$

$$b_{33} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{3u}^2\bar{y}}{4.364}, \quad (3.10)$$

$$b_{12} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{1u}z_{2u}\bar{y}}{8}, \quad (3.11)$$

$$b_{13} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{1u}z_{3u}\bar{y}}{8}, \quad (3.12)$$

$$b_{23} = \frac{\sum_{i=1}^n z_{2u}z_{3u}\bar{y}}{8}. \quad (3.13)$$

Результаты расчета коэффициента уравнения регрессии представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5.

Результаты расчета коэффициента уравнения регрессии

z_0y	z_1y	z_2y	z_3y	z_1^2y	z_2^2y	z_3^2y	z_1z_2y	z_1z_3y	z_2z_3y
19,392	-19,392	-19,392	-19,392	5,1712	5,1712	5,1712	19,392	19,392	19,392
24,651	24,651	-24,651	-24,651	6,5736	6,5736	6,5736	-24,651	-24,651	24,651
16,646	-16,66	16,646	-16,646	4,4389333	4,43893	4,4389333	-16,646	16,646	-16,646
21,658	21,658	21,658	-21,658	5,775466	5,7754	5,775466	21,658	-21,658	-21,658
19,897	-19,89	-19,89	19,897	5,3058666	5,30586	5,3058666	19,897	-19,897	-19,897
24,892	24,892	-24,892	24,892	6,637866	6,6378	6,637866	-24,892	24,892	-24,892

z_{0y}	z_{1y}	z_{2y}	z_{3y}	$z_1^2 y$	$z_2^2 y$	$z_3^2 y$	$z_1 z_{2y}$	$z_1 z_{3y}$	$z_2 z_{3y}$
19,089	-19,089	19,089	19,089	5,0904	5,0904	5,0904	-19,089	-19,089	19,089
23,6925	23,6925	23,6925	23,6925	6,318	6,318	6,318	23,6925	23,6925	23,6925
18,522	-22,51	0	0	13,77837	-13,582	-13,5828	0	0	0
27,126	32,969	0	0	20,17882	-19,892	-19,8924	0	0	0
29,417	0	-35,75	0	-21,5728	21,883	-21,57283	0	0	0
20,604	0	25,042	0	-15,1096	15,327	-15,1096	0	0	0
18,315	0	0	-22,26026	-13,431	-13,431	13,62438	0	0	0
17,372	0	0	21,11413	-12,73946	-12,739	12,92289	0	0	0
24,667	0	0	0	-18,0895	-18,085	-18,0895	0	0	0
21,729	2,7684	-1,685	0,3722109	-0,383517	1,09674	-3,754933	-0,0798	-0,0840	0,46643
b_0	b_1	b_2	b_3	b_{11}	b_{22}	b_{33}	b_{12}	b_{13}	b_{23}
23,9507	2,76845	-1,685	0,372210	-0,38351	1,0967	-3,754933	-0,0798	-0,0840	0,466437

Некоторые из коэффициентов регрессии могут оказаться пренебрежимо малыми – незначимыми [44]. Чтобы установить, значим коэффициент или нет, необходимо прежде всего вычислить оценку дисперсии, с которой он находится:

$$S_{(y)}^2 = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^n S_u^2, \quad (3.14)$$

$$S_u^2 = \frac{\Delta y^2}{2}. \quad (3.15)$$

Результаты расчета оценки дисперсии представлены в таблице 3.6.

Таблица 3.6.

Результаты расчета оценки дисперсии

$S_{u(1)}^2$	$S_{u(2)}^2$	$S_{u(3)}^2$	$S_{u(4)}^2$	$S_{u(5)}^2$	$S_{u(6)}^2$	$S_{u(7)}^2$	$S_{u(8)}^2$	$S_{u(9)}^2$	$S_{u(10)}^2$	$S_{u(11)}^2$	$S_{u(12)}^2$	$S_{u(13)}^2$	$S_{u(14)}^2$	$S_{u(15)}^2$
0,15	0,25	0,24	0,78	0,16	1,03	0,14	1,48	0,57	0,30	2,06	0,65	0,14	0,12	0,60

Для проверки воспроизводимости опытов находим отношение наибольшей из оценок дисперсий к сумме всех оценок дисперсий (расчетное значение критерия Кохрена) [45]:

$$G_p = \frac{\max S_u^2}{\sum_{u=1}^N S_u^2}. \quad (3.15)$$

Процесс считается воспроизводимым если выполняется следующее неравенство:

$$G_p = \frac{\max S_u^2}{\sum_{i=1}^N S_u^2} \leq G_{T(0,05; t_n; t_i)}. \quad (3.16)$$

Расчетное значение критерия Кохрена составило $G_p = 0,21$, табличное значение данного коэффициента составляет $G_T = 0,3346$ следовательно неравенство (3.16) выполняется. Испытания можно считать воспроизводимыми, а оценки дисперсии – однородными. Дисперсия воспроизводимости согласно расчету составляет $S_{(y)}^2 = 0,64$.

Определяем среднее квадратическое отклонение коэффициентов:

$$S_{\{y\}} = \sqrt{\frac{S_{(y)}^2}{n \cdot m}} = \sqrt{\frac{0,64^2}{15 \cdot 2}} = 0,15. \quad (3.17)$$

Среднее квадратическое отклонение коэффициентов согласно расчету составляет 0,15. Из таблиц распределения Стьюдента по числу степеней свободы $n(k-1) = 15 \cdot (3-1) = 30$ при уровне значимости $\alpha = 0,05$ находим $t_{кр} = 2,13$. Следовательно, $t_{кр} \cdot S_{\{y\}} = 2,04 \cdot 0,15 = 0,306$. Сравнивая полученное значение с коэффициентами уравнения регрессии, видим, что все коэффициенты кроме b_{12} и b_{13} больше по абсолютной величине 0,306. Следовательно, все коэффициенты кроме b_{12} и b_{13} значимы. Полагая b_{12} и $b_{13} = 0$, получаем уравнение регрессии в кодированных переменных:

$$y = 23,98 + 2,76 \cdot x_1 - 1,69 \cdot x_2 + 0,37 \cdot x_3 - 0,38 \cdot x_1^2 + 1,1 \cdot x_2^2 - 3,8 \cdot x_3^2 + 0,46 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3.18)$$

Проверим полученное уравнение на адекватность по критерию Фишера [46]. Так как дисперсия воспроизводимости найдена в предыдущем пункте, то для определения расчетного значения критерия $F_{\text{расч}}$ необходимо вычислить остаточную дисперсию $S_{\text{ост}}^2$. Для этого найдем значения изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии \tilde{y}_l ($l = 1, \dots, 15$), подставляя $+1$ или -1 вместо x_i в соответствии с номером l эксперимента из табл. 3.2.

Результаты расчета значений изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7.

Результаты расчета значений изучаемого параметра по полученному уравнению регрессии

\tilde{y}_1	\tilde{y}_2	\tilde{y}_3	\tilde{y}_4	\tilde{y}_5	\tilde{y}_6	\tilde{y}_7	\tilde{y}_8	\tilde{y}_9	\tilde{y}_{10}	\tilde{y}_{11}	\tilde{y}_{12}	\tilde{y}_{13}	\tilde{y}_{14}	\tilde{y}_{15}
18.5	25.4	19.0	21.1	19.7	25.2	17.2	22.8	20.0	25.5	29.9	22.8	22.0	22.8	22.8

Находим остаточную дисперсию

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^8 (\tilde{y} - \bar{y})^2}{n \cdot k - 1} = [(18,86 - 19,4)^2 + (25,44 - 24,7)^2 + (19,0 - 16,6)^2 + (21,14 - 21,7)^2 + (19,74 - 19,9)^2 + (25,26 - 24,9)^2 + (17,38 - 19,1)^2 + (22,8 - 23,7)^2 + (20,0 - 18,5)^2 + (25,5 - 27,1)^2 + (29,9 - 29,4)^2 + (22,8 - 20,6)^2 + (22,06 - 18,3)^2 + (22,8 - 17,4)^2 + (22,8 - 24,7)^2] / 44 = 1.54. \quad (3.19)$$

Находим расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч}}$

$$F_{\text{расч}} = \frac{s_{\text{ад}}^2}{s_{\{y\}}^2} = \frac{1.54}{0.64} = 2.4. \quad (3.20)$$

Табличное значение критерия $F_{\text{табл}}$ находим из таблицы критических точек распределения Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ по соответствующим степеням свободы $k_1 = k - 1 = 3 - 1 = 2$ и $k_2 = n(m - 1) = 15 \cdot 1 = 15$, m – количество повторений каждого

эксперимента, $F_{\text{табл}} = 3,68$ Так как $F_{\text{расч}} = 2.4 < F_{\text{табл}} = 3.68$, то уравнение регрессии адекватно. Проведем интерпретацию полученной модели:

$$y = 23.98 + 2.76 \cdot x_1 - 1.69 \cdot x_2 + 0.37 \cdot x_3 - 0.38 \cdot x_1^2 + 1.1 \cdot x_2^2 - 3.8 \cdot x_3^2 + 0.46 \cdot x_2 \cdot x_3. \quad (3.21)$$

По уравнению видно, что наиболее сильное влияние оказывает фактор x_2 – площадь теплообменной поверхности, так как он имеет наибольший по абсолютной величине коэффициент. После него по силе влияния на отклик (температура воздуха на выходе из установки) идут: двойное взаимодействие факторов x_2 и x_3 ; фактор x_3 – скорость воздушного потока в теплообменных камерах установки.

Полученное уравнение регрессии с использованием натуральных величин имеет следующий вид:

$$T_1 = 23,98 + 0,96 \cdot T_0 - 30,1 - 0,28 \cdot S + 6,01 + 0,45 \cdot w_0 + 1,35 + (-0,96 \cdot T_0)^2 + (-0,28 \cdot S + 6,01)^2 - (0,45 \cdot w_0 + 1,35)^2 + 0,46 \cdot (-0,28 \cdot S + 6,01) \cdot 0,45 \cdot w_0 + 1,35, \quad (3.22)$$

где T_1 – температура охлажденного воздуха, К;

T_0 – температура охлаждаемого воздуха, К;

S – площадь теплообменной поверхности аккумуляторов холода, м²;

w_0 – скорость охлажденной воздушной струи на выходе из установки, м/с.

3.2 Обоснование основных параметров экспериментальной установки для охлаждения воздуха и методики проведения лабораторных испытаний

Теоретические исследования процесса охлаждения воздуха в локальной зоне подземной горной выработки выявили необходимость проведения экспериментальных исследований в модельных и натуральных условиях.

Специально созданная модельная установка соответственно требует обоснования основных своих параметров: габаритных размеров и производительности. По охлажденному установкой воздуху и его температуры на выходе, диаметру выходного отверстия.

Аэродинамическое моделирования основано на общих законах подобия механических систем [47, 48]. Два потока газа подобны между собой, если для всех сходственных точек обоих потоков соблюдаются условия подобия их кинематических и динамических характеристик. Кроме того, потоки должны быть подобны геометрически.

В дальнейшем параметры относящиеся к модели будем писать с индексом «М», а параметры, описывающие процесс в натуральных условиях с – индексов «Н».

Подход, когда при нахождении чисел и критериев подобия, исходят из известных уравнений, является одним из основных методов моделирования [49].

Так из дифференциальных уравнений теоретического раздела (2,25), (2,26), (2,36) получаем известные критерии моделирования:

$$Cu = \frac{u \cdot \Delta t}{\Delta x} - \text{критерий Куранта}, \quad (3.23)$$

$$Fo = \frac{Dx \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} - \text{критерий Фурье}, \quad (3.24)$$

где $u = u(x)$ – скорость воздуха в охлаждаемой зоне, м/с.;

Δt – интервал времени, с.;

Δx – интервал продольной координаты, м;

$Dx = a$ – коэффициент теплопроводности, м²/с.

Следует использовать наиболее важный критерий подобия, получаемый из уравнения движения охлажденной воздушной струи подаваемой по горной выработке [50].

Это близкий по написанию к критерию Куранта критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{u \cdot \ell}{\nu}, \quad (3.25)$$

где u – придельная скорость воздуха, м/с.;

ℓ – характерный линейный размер, м.;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Так как кинематическую и динамическую вязкость в проводимых экспериментах изменить по сравнению с натурными условиями не представляется возможным, принимаем $\nu_H = \nu_M$. Поэтому при соблюдении критерия Рейнольдса для процесса движения воздуха в струе необходимо выполнить следующее условие [51]:

$$u_M \cdot \ell_M = u_H \cdot \ell_H.$$

Введем масштаб моделирования по механическому размеру

$$\lambda_1 = \frac{\ell_H}{u_H} = \frac{\ell_M}{u_M}, \quad (3.26)$$

при этом $\lambda_1 \geq 1$.

Из этого следует, что $\ell_M \leq z_M$, иначе линейные размеры ℓ_H будут такими, что установка не будет помещаться в горных выработках, а доставка с поверхности до рабочего места будет возможна только в разобранном виде. Доставка установки к месту эксплуатации в горной выработке в разобранном виде не допустимо из соображений оперативного применения.

По соотношению (3.26) вводим масштаб моделирования по скорости воздуха в струе охлажденного воздуха:

$$\lambda_2 = \frac{u_H}{u_M} = \frac{\ell}{\lambda_1}. \quad (3.27)$$

Масштаб по времени протекания процессов запишем в следующем виде:

$$\lambda_3 = \frac{(\Delta t)_H}{(\Delta t)_M} = \frac{\lambda_1}{\left(\frac{1}{\lambda_1}\right)} = \lambda_1^2, \quad (3.28)$$

что согласуется с критерием Фурье.

Такое соотношение чисел $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, например при $\lambda_1 = 2$, т.е. линейному уменьшению размеров установки в 2 раза, приведет к уменьшению ее объема в 8 раз, соответственно и количество аккумуляторов холода. При этом скорость воздуха в установке возрастает в 2 раза, а время его пребывания в установке уменьшается в 4 раза. На выходе из установки получаем температуру T_1 , близкую к T_0 . Тогда по формуле (2.74) температура T в охлаждаемой зоне практически не изменится. В этом случае установка не эффективна. Такое соотношение чисел подобия приводит нас к заключению выбрать $\lambda_1 = 1$, т.е. проводить эксперименты на установке, применяемой в натуральных условиях.

Для проверки справедливости полученных теоретических выводов, проведен комплекс лабораторных испытаний на разработанном и изготовленном экспериментальном образце УОВ. Испытания экспериментального образца УОВ производились на базе специализированной лаборатории кафедры «Охрана труда и аэрология» ГОУВПО «ДОННТУ». Схема проведения лабораторных испытаний представлена на рисунке 3.1. УОВ защищена патентом на полезную модель (Приложение 3).

Основной целью лабораторных испытаний является проверка работоспособности экспериментального образца УОВ (рисунок 3.2), а также установление его производительности и определения параметров охлаждаемой зоны.

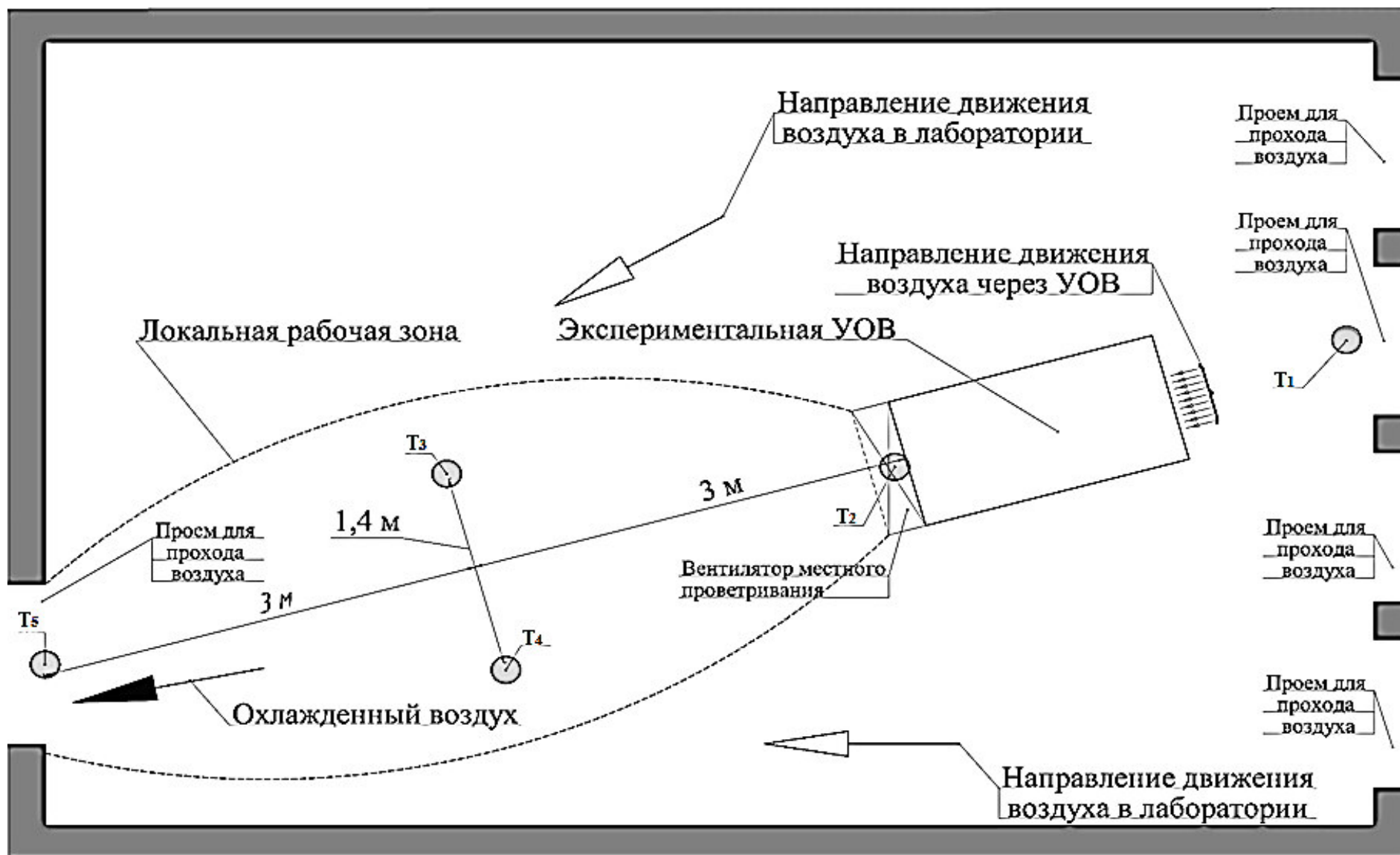


Рисунок 3.1 – Схема лабораторных испытаний экспериментального образца УОВ

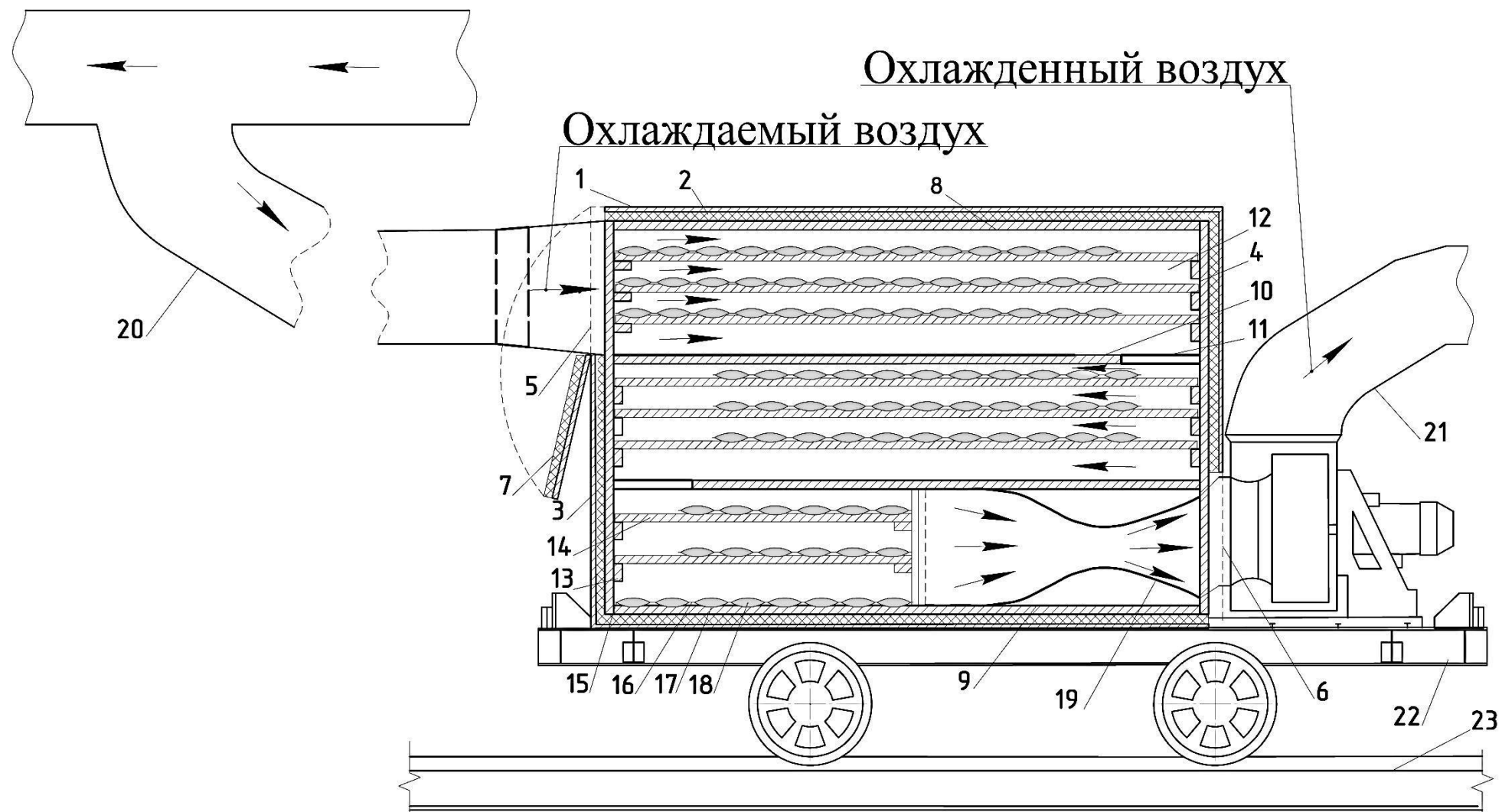


Рисунок 3.2 – Схема экспериментального образца установки для охлаждения воздуха

УОВ содержит корпус 1, выполненный из оцинкованной листовой стали с теплоизолирующим слоем 2 из пенополистирола. В противоположные торцевые стенки 3 и 4 вмонтированы входной и выходной люки 5 и 6 соответственно для прохода воздуха с откидными крышками 7, две другие противоположные боковые стенки выполнены съемными.

Внутренний объем корпуса 1 разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам 8, 9 воздухонепроницаемыми перегородками 10 с проемами 11 на нечетное число теплообменных камер 12. При этом верхняя теплообменная камера взаимосвязана с входным люком 5, а нижняя камера с выходным люком 6. С внутренней стороны противоположных боковых стенок 3 и 4 расположены направляющие 13, на которых размещены выдвижные решетчатые полки 14..

На каждой полке 14 размещены аккумуляторы холода 15, выполненные из полиэтилена толщиной 150 мкм. АХ выполнены с поперечными пережимами 16 вдоль своей продольной оси, образующими ячейки 17 в виде вытянутого эллипсоида вращения. В ячейках 17 размещена ЛС 18 с концентрацией NaС – 23 %. Капсулы АХ 15 расположены на полках 14 теплообменных камер 12 по длине полки 14 в один слой и в несколько рядов по ее ширине корпуса 1. В нижней теплообменной камере со стороны выходного люка 6 установлено взаимосвязанное с ним сопло 19.

Для подачи охлаждаемого воздуха во внутренний объем устройства предусмотрено размещение у передней боковой стенки корпуса вентилятора местного проветривания для взаимосвязи с устройством посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20, подсоединяемого к входному люку 3. Для направления охлажденного воздуха в локальную рабочую зону подземной горной выработки предусмотрен подсоединяемый к выходному люку воздушный трубопровод 21. Устройство смонтировано на платформе 22 шахтной вагонетки для транспортирования по железнодорожным путям 23 с помощью электровоза, лебедки или вручную.

Заморозка АХ осуществляется в морозильных камерах. При полной заморозке температура аккумуляторов холода составляет 252 К.

Движение воздуха в лаборатории происходило за счет депрессии естественной тяги лаборатории. Расход воздуха через установку обеспечивался посредством вентилятора ВЦ 4-70 №5 (рисунок 3.3).



Рисунок 3.3 – Вентилятор ВЦ 4-70 №5

Лабораторные испытания экспериментального образца УОВ проводились в весенний и летний период года, что обеспечило температуру воздуха поступающего извне в лабораторию 304-306 К.

Поскольку у УОВ рабочий цикл длится с момента загрузки до достижения в локальной зоне температуры 299 К, для установления зависимости времени защитного действия от количества АХ помещенных в теплообменные камеры УОВ была проведена серия лабораторных испытаний. Испытания УОВ проводилось с 50;75;100% загрузкой теплообменных камер АХ. В ходе испытаний контролировалась температура воздуха на входе и выходе из УОВ а так же расход воздуха через нее (таблица 3.8.).

Результаты испытания УОВ с различной степенью загрузки

№ п/п	Т _{время} МИН.	50 % загрузки				75 % загрузки				100 % загрузки			
		Т ₁ , К	Т ₂ , К	V _{возд} м/с	Q м ³ /с	Т ₁ , К	Т ₂ , К	V _{возд} м/с	Q м ³ /с	Т ₁ , К	Т ₂ , К	V _{возд} м/с	Q м ³ /с
0	0	303,2	291,7	4,0	2,0	304,2	290,4	4,0	2,0	306,2	289,2	4,0	2,0
1	10	304,2	292,6	4,0	2,0	303,8	291,1	4,0	2,0	306,2	289,6	4,0	2,0
3	30	303,2	294,2	4,0	2,0	303,4	292,3	4,0	2,0	305,2	290,4	4,0	2,0
6	60	304,3	297,0	4,0	2,0	302,3	295,4	4,0	2,0	302,6	293,9	4,0	2,0
9	90	303,2	298,4	4,0	2,0	302,3	297,7	4,0	2,0	302,4	297	4,0	2,0
12	120	303	300,9	4,0	2,0	303	299,3	4,0	2,0	303,1	297,8	4,0	2,0
15	150	303,2	303,3	4,0	2,0	303,3	301,6	4,0	2,0	303,1	300	4,0	2,0

Графическое представление результатов испытания УОВ с различной степенью загрузки теплообменных камер АХ показано на рисунке 3.4.

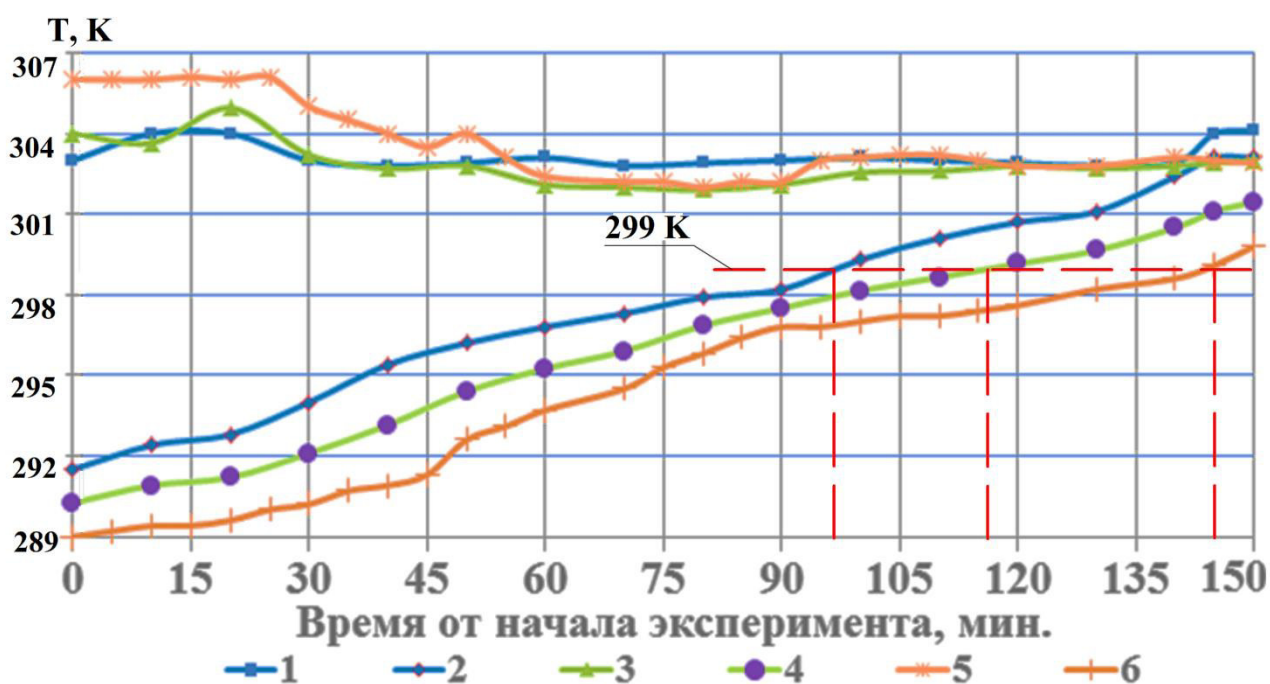


Рисунок 3.4 – Испытания установки с различной степенью загрузки:

- 1 – температура воздуха на входе в установку (при 50% загрузке);
- 2 – температура воздуха исходящего из установки (при 50% загрузке);
- 3 – температура воздуха на входе в установку (при 75% загрузке);
- 4 – температура воздуха исходящего из установки (при 75% загрузке);
- 5 – температура воздуха на входе в установку (при 100% загрузке);
- 6 – температура воздуха исходящего из установки (при 100% загрузке).

Как видно из рисунка 3.4, увеличение количества АХ в теплообменных камерах УОВ влечет за собой снижение температуры на выходе из нее, а также при этом увеличивается время ее рабочего цикла.

Для установления параметров зоны эффективного действия УОВ была проведена серия экспериментов. Схема проведения экспериментов по определению зоны эффективного действия показана на рисунке 3.1. В таблице 3.9. приведены усредненные результаты серии испытаний.

Таблица 3.9.
Результаты испытаний по определению зоны действия УОВ

$T, \text{мин.}$	T_1, K	T_2, K	T_3, K	T_4, K	T_5, K	$V_{\text{выход УОВ}}, \text{ м/с}$	$Q_{\text{УОВ}}, \text{ м}^3/\text{с}$
10	305,7	289,2	298,2	298,2	300,3	4,0	3,2
30	305,2	290,4	298,2	298,2	300,3	4,0	3,2
60	303,8	293,9	298,3	298,4	300,5	4,0	3,2
90	303,2	297	299,2	299,4	299,5	4,0	3,2
120	303,4	297,8	299,2	299,2	300,4	4,0	3,2
150	303,3	298,4	299,6	300,2	300,5	4,0	3,2

В ходе ведения экспериментов контролировалась температура воздуха на входе и на выходе из УОВ, а также на расстоянии трех и шести метров по ходу движения охлажденной воздушной струи, скорость движения воздуха на выходе из УОВ (рисунок 3.1). Графическое представление усредненных результатов из серии экспериментов показано на рисунке 3.5.

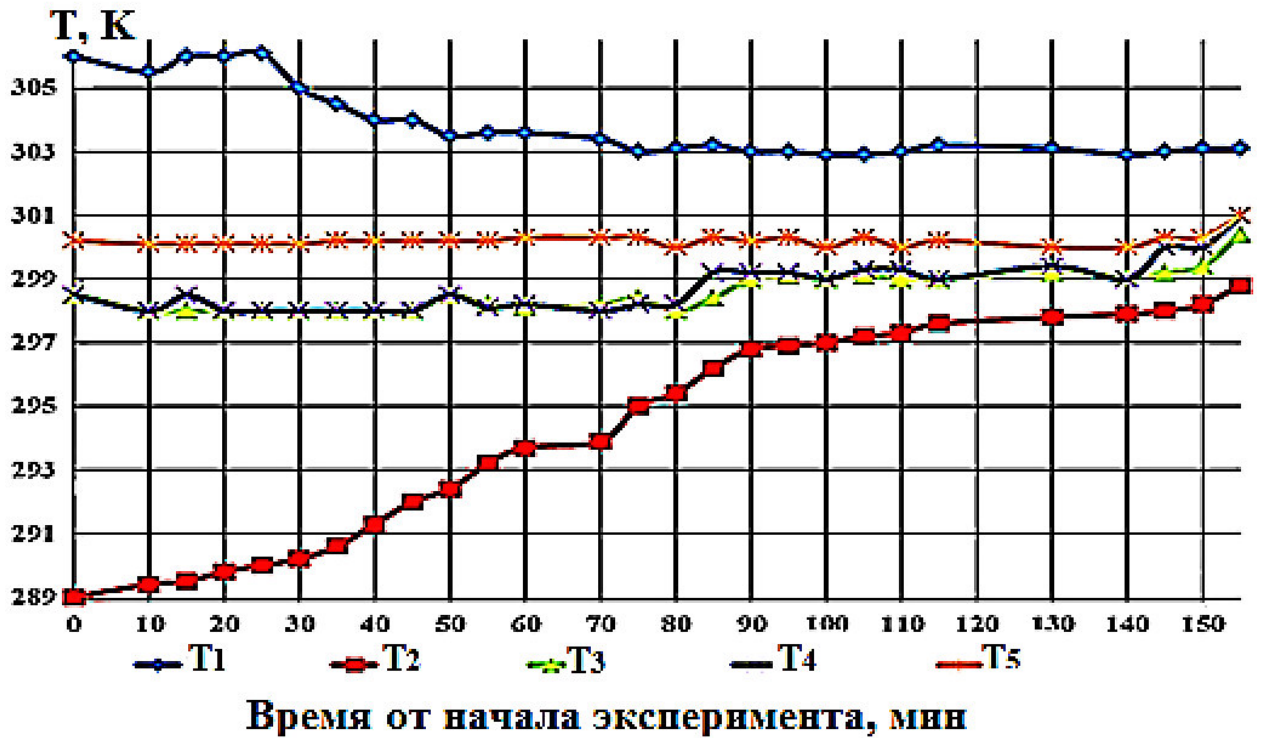


Рисунок 3.5 – Результаты испытаний по определению зоны действия УОВ:
 T_1 – температура на входе в УОВ (температура поступающего воздуха в лабораторию); T_2 – температура исходящего из УОВ воздуха;
 T_3, T_4 – температура на расстоянии 3 м от УОВ по ходу движения воздуха;
 T_5 – температура воздуха на расстоянии 6 м от УОВ по ходу движения воздуха.

Эксперименты по определению зоны действия проводились при 100% загруженности теплообменных камер УОВ АХ. Как видно из рисунка 3.5, после начала продувки воздуха через УОВ температура на расстоянии 3-х метров по ходу движения воздуха (T_3, T_4) значительно снизилась с 305 К до 298 К, и сохранялась на этом уровне на протяжении восьмидесяти минут, затем произошло ее повышение до 299 К. Температура на выходе из УОВ (T_2) после начала продувки воздуха через теплообменные камеры постоянно увеличивалась, и через 150 минут с начала эксперимента достигла 297 К. Температура на расстоянии 6 м от УОВ, по ходу движения воздушной струи (T_5), на протяжении всего эксперимента находилась в пределах 299-302 К.

Во время ведения аварийно-восстановительных, ремонтных и некоторых горноспасательных работ в шахтах, во многих случаях наблюдалось ослабление вентиляционного потока. Поскольку скорость движения воздуха снижается,

происходит рост температуры воздуха, а, следовательно, ухудшаются условия выполнения работ.

Для определения эффективности УОВ при охлаждении локальной рабочей зоны, в которой практически отсутствует движение воздуха, была проведена серия экспериментов. В ходе ведения экспериментальных исследований велся контроль температуры на входе и на выходе из УОВ, а также контролировалась скорость движения воздуха на выходе из нее. Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 3.6.



Рисунок 3.6 – Схема проведения экспериментальных исследований по охлаждению модели локальной рабочей зоны, в которой ослаблена проточная вентиляция

Во время проведения экспериментов двери и окна в лабораторию были закрыты, что свело к минимуму приток и отток тепла в помещении. После окончания эксперимента, продувка воздуха через теплообменные камеры установки прекращалась, и в помещение открывались окна и двери для того, чтоб произошло выравнивание температуры внутри лаборатории с температурой окружающей среды. По истечению 10 минут выполнялся еще один замер температур воздуха в лаборатории. Усредненные результаты серии экспериментальных исследований представлены на рисунке 3.7.

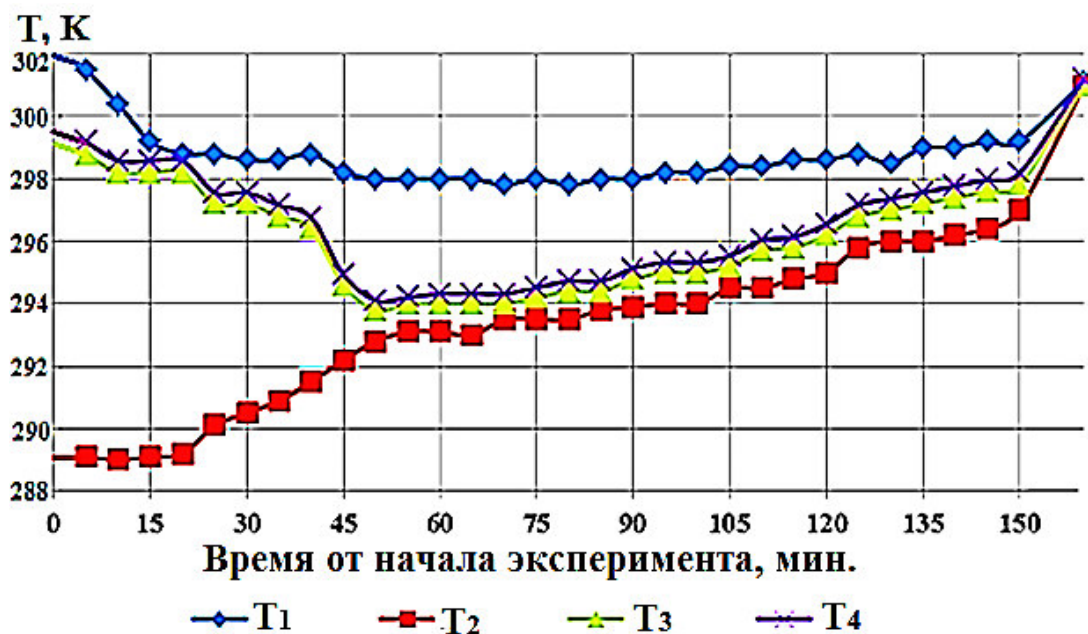


Рисунок 3.7 – Результаты экспериментов по определению охлаждения рабочего пространства с отсутствием вентиляции:

T_1 – температура воздуха на входе в УОВ; T_2 – температура воздуха на выходе из УОВ; T_3 , T_4 – температура воздуха на расстоянии 6 м УОВ по ходу движения охлажденного воздуха.

Как видно из рисунка 3.7, через 10 минут после начала эксперимента в рабочей зоне (T_3 , T_4) произошло снижение температуры с 302 К до 299 К, через 50 минут температура снизилась до 294 К. Начиная с пятидесятой минуты было зафиксировано плавное возрастание температуры. При окончании эксперимента температура в рабочей зоне составляла 298 К. После выравнивания температуры в лаборатории с окружающей средой было зафиксировано возрастание температуры до 301 К, что свидетельствует об эффективности работы УОВ.

3.3 Проведение натурных испытаний для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Целью экспериментальных исследований является проверка работоспособности разработанной УОВ непосредственно в подземных горных выработках, определение зоны действия, а также определение адекватности полученных результатов теоретических исследований теплообменных процессов

нагретого воздуха, в горной выработке с охлажденной струей воздуха, исходящей из УОВ.

Методика проведения экспериментов базировалась на результатах проведенных теоретических исследований и на теории планирования экспериментов. Предварительно, как это принято в инженерной практике, дорогостоящим и трудоемким натурным экспериментам предшествовала серия лабораторных экспериментов по определению эффективности охлаждения воздуха УОВ в различных условиях. Они показали эффективность применения УОВ на базе АХ для локального снижения температуры воздуха в рабочей зоне, а также для снижения температуры в рабочих зонах при ослабленной проточной вентиляции.

Натурные эксперименты проводились в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР. Схема горных выработок учебной шахты представлена на рисунке 3.8 (Приложение Б).

Как видно из рисунка 3.8 учебная шахта вскрыта наклонным стволом, проветривается вентилятором ВОКД – 1,5. Участковые горные выработки закреплены металлической арочной крепью с железобетонной затяжкой, капитальные выработки имеют монолитную бетонную крепь. В шахте имеется две очистные выработки - одна пологого, другая крутого падения. К подготовке и проведению эксперимента привлекалось отделение горноспасателей.

На основании схемы вентиляции и характеристик подземных горных выработок учебной шахты для изучения термодинамических параметров рудничного воздуха в подземных горных выработках, был выбран и согласован с руководством шахты маршрут для проведения температурной съемки. Для выбора места проведения экспериментов, необходимо было исследовать тепловлажностные показатели вентиляционного потока в выработках, соответствующим разработанным в методике эксперимента требованиям по термодинамическим показателям воздушной струи, количестве и скорости движения рудничного воздуха в выработке.

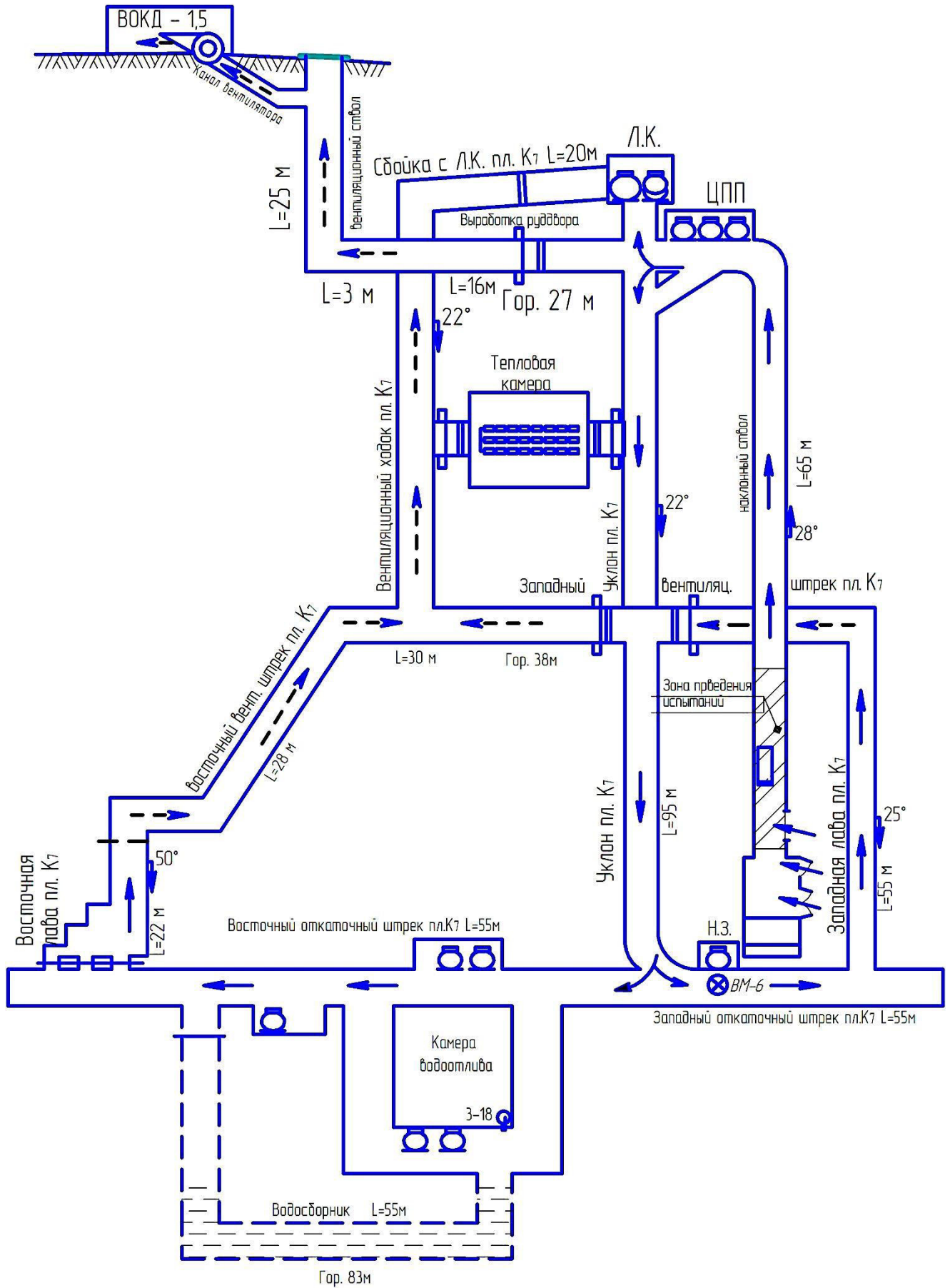


Рисунок 3.8 – Схема расположения горных выработок учебной шахты Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР

Для проведения серии экспериментов был выбран наклонный ствол, т.к. в нем обеспечивались необходимые температурные условия за счет поступления нагретого воздуха с дневной поверхности.

Наклонный ствол имеет трапециевидную бетонную крепь с сечением в свету 9 м^2 , водоотливную канавку закрепленную сборным железобетоном, рельсовый путь с колеей $0,6 \text{ м}$ и деревянный трап.

Перед спуском в учебную шахту, экспериментальную УОВ размещают на шахтной платформе типа «П-2,5». Во время проведения испытаний экспериментальную УОВ размещали в центре выработки, и фиксируют хомутами к рельсовому пути. Загрузку УОВ АХ производили на поверхности. Движение воздуха по наклонному стволу осуществлялось вентилятором главного проветривания ВОКД – 1,5. Расход воздуха через УОВ осуществлялась посредством вентилятора местного проветривания.

Во время проведения эксперимента регистрировались физические параметры воздуха на входе в УОВ и в охлаждаемой зоне: атмосферное давление, скорость движения на выходе из УОВ и в сечении выработки, влажность и температура перед установкой и в охлаждаемой зоне. Схема проведения эксперимента показана на рисунке 3.9.



Рисунок 3.9 – Схема проведения эксперимента в наклонном стволе учебной шахты (вид сверху):

1-12 – точки замера температур воздуха на замерных станциях в ходе эксперимента.

Как видно из рисунка 3.9, для контроля физических параметров воздуха во время проведения опытно-промышленных испытаний экспериментальной УОВ в охлаждаемой зоне горной выработки были оборудованы три замерные станции. Первая замерная станция располагалась на расстоянии 1,5 м от экспериментальной УОВ по ходу движения вентиляционной струи, вторая на расстоянии 3 м и третья на расстоянии 4,5 м. Для замера температуры воздуха в замерных станциях были смонтированы деревянные конструкции, у которых горизонтальная планка фиксировалась в трех положениях: на высоте 1,2 м от почвы выработки. На горизонтально установленных планках были закреплены по четыре аспирационных психрометра МВ-4М. Замерные станции обслуживались бригадой из шести человек, по два человека на каждой замерной станции. Замеры производились одновременно через каждые десять минут.

В зоне проведения экспериментальных исследований так же проводились инструментальные наблюдения в каждом замерном пункте. При этом измерялись: – геометрические размеры выработки; – габариты оборудования; – размеры стенок объектов, находящихся в горной выработке.

Все результаты измерений заносились в журнал наблюдения. Обработка результатов исследований проводилась в соответствии с [52] и выполнялась на компьютерной технике.

Результаты измерения физических параметров воздуха представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10.
Показания температур воздуха в точках замера в зависимости от времени

Т _{времени} , мин.	Атмосферное давление, мм. рт. ст.	Q _{воз.} в г.в. м ³ /с.	Q _{воз.} уст-ка м ³ /с.	Относительная влажность воздуха, %	Т _{на входе в устан.} , К	T _{1,К}	T _{2,К}	T _{3,К}	T _{4,К}	T _{5,К}	T _{6,К}	T _{7,К}	T _{8,К}	T _{9,К}	T _{10,К}	T _{11,К}	T _{12,К}
10	755,0	6,75	2,0	24,0	303,2	300,7	301,7	301,6	291,7	292,3	293,2	292,1	293,1	294,1	301,0	301,9	302,3
30	750,0	6,84	2,0	25,0	302,2	301,0	301,9	301,9	293,1	293,1	294,2	292,4	294,3	295,0	301,2	302,0	302,4

Т _{время} , мин.	Атмосферное давление, мм. рт. ст.	Q воз. в г.в. м ³ /с.	Q воз. уст-ка м ³ /с.	Относительная влажность воздуха, %	Т _{на входе в устан.} , К	T ₁ , К	T ₂ , К	T ₃ , К	T ₄ , К	T ₅ , К	T ₆ , К	T ₇ , К	T ₈ , К	T ₉ , К	T ₁₀ , К	T ₁₁ , К	T ₁₂ , К
60	755,0	6,75	2,0	24,0	304,2	301,7	302,3	302,2	294,6	294,8	295,8	294,3	295,8	296,5	301,4	302,4	302,6
90	755,0	7,2	2,0	25,0	303,2	301,9	302,5	302,5	295,9	296,1	297,4	295,9	296,8	298,1	302,1	302,6	302,9
120	752,0	7,02	2,0	25,0	303,2	302,5	302,8	302,9	297,1	297,8	298,4	297,3	298,6	299,3	302,7	302,9	303,0
150	750,0	6,75	2,0	24,0	303,2	302,9	303,1	303,1	298,8	299,6	300,1	299,0	300,2	300,8	303,0	303,2	303,2

Для графического представления данных занесенных в таблицу 3.5, результаты экспериментов приведены ниже в виде графиков (по длине охлаждаемой зоны), на которых показано изменение температуры в точках замера 1-12 (рисунок 3.9) во времени. На рисунке 3.10 приведена усредненная температура серии из трех экспериментов в точках 1,2,3.

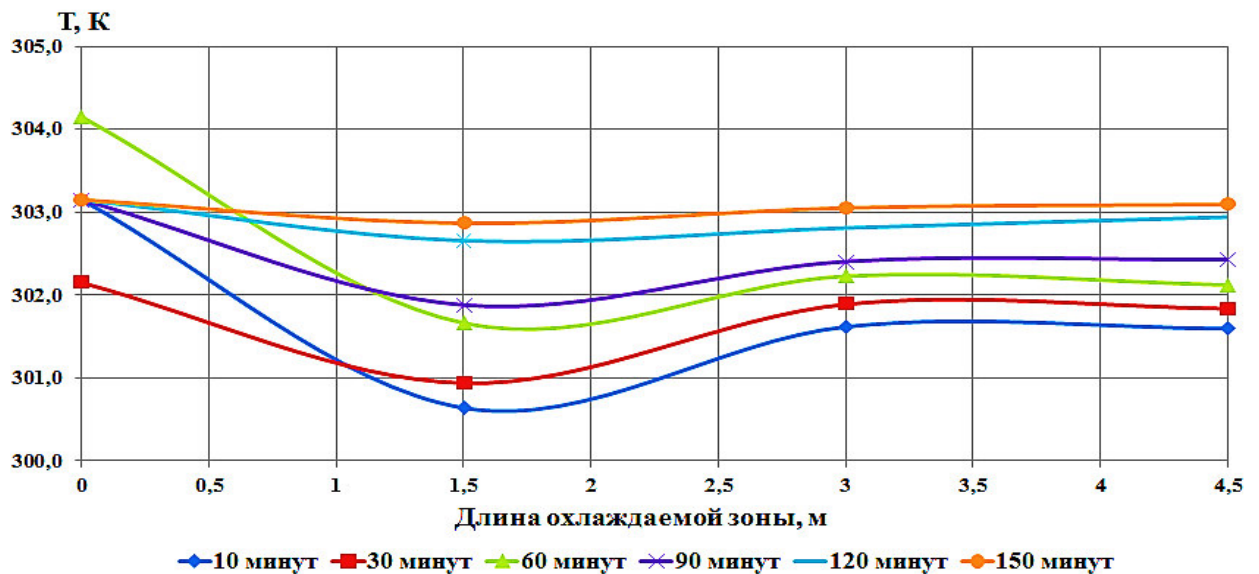


Рисунок 3.10 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 1,2,3

Из рисунка 3.10 видно как снижается температура рудничного воздуха проходящего по горной выработке при смешивании со струей воздуха, исходящей из вентиляционный трубопровод УОВ по длине охлаждаемой зоны в ходе эксперимента. Точки измерения параметров воздуха 1,2,3 находятся на расстоянии 0,5 м от крепи выработки и рассредоточены по длине соответственно

1,5; 3 и 4,5 м от УОВ по ходу движения воздушной струи.

Как видно из рисунка 3.10, температура рудничного воздуха по длине зоны снижается, однако остается выше предельно допустимой ПБ. Через десять минут от начала эксперимента, температура на расстояние 1,5 м по ходу движения воздуха снизилась с 303,15 К до 300,65 К, по мере продвижения воздуха по выработке было зафиксировано рост его температуры до 302,85 К. При последующих замерах параметров рудничного воздуха в ходе эксперимента наблюдался постоянный рост температуры и на 150 минуте эксперимента охлаждение воздуха в точках замера 1,2,3 не зафиксировано.

На рисунке 3.11 приведена усредненная температура серии из трех экспериментов в точках 4,5,6.

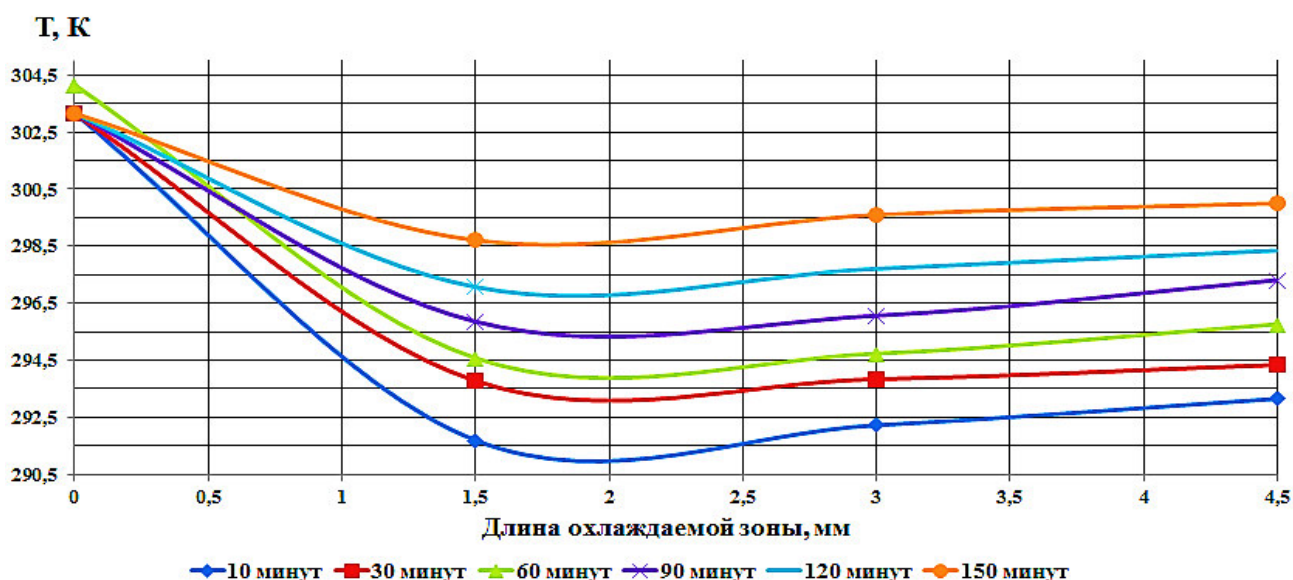


Рисунок 3.11 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 4,5,6

Как видно из рисунка 3.11, температура в точках 4,5,6 которым соответствует расстояние от УОВ по походу движения вентиляционной струи 1,5; 3 и 4,5 м соответственно, снижается. Через десять минут от начала эксперимента, температура на расстояние 1,5 м по ходу движения воздуха снизилась с 303,15 К до 291,7 К, по мере продвижения воздуха по выработке был зафиксирован рост его температуры до 293,15 К. При последующих замерах параметров рудничного воздуха в ходе эксперимента наблюдался постоянный рост температуры и на

150-й минуте эксперимента на расстоянии 1,5 м по ходу движения воздушной струи температура снизилась с 303,15 К до 298,7 К по мере продвижения воздуха по выработке был зафиксирован рост его температуры до 300 К.

Из анализа данных показанных на рисунке 3.11 видно, что на протяжении всего эксперимента (150 минут) в охлаждаемой зоне обеспечивалась нормативная (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более 299,15 К) температура воздуха. Из графика видно, что в начале эксперимента нормативная температура обеспечивалась на расстоянии 0,5 м от УОВ по ходу движения воздуха, а рабочая зона, где обеспечивался тепловой режим, составляла 4 м. В ходе эксперимента температура АХ в УОВ увеличивалась, что вызвало рост температуры на выходе из нее и сокращение зоны охлаждения до 3 м (по ходу вентиляционной струи) на 150-й минуте.

На рисунке 3.12 приведена усредненная температура серии из трех экспериментов в точках 7,8,9.

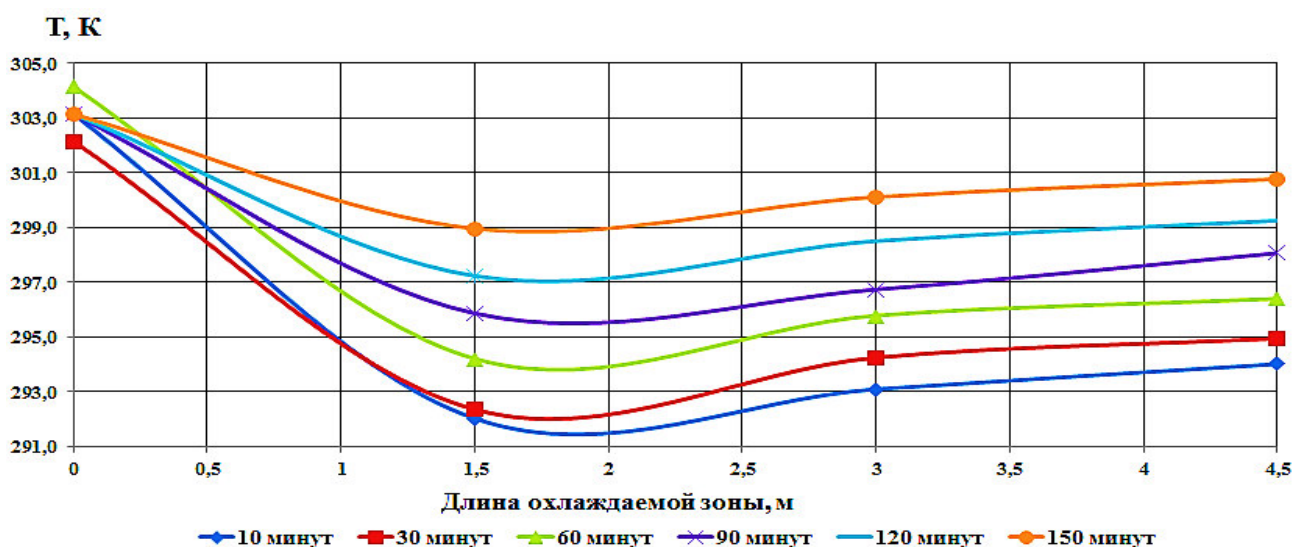


Рисунок 3.12 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 7,8,9

Из рисунка 3.12 видно, что характер изменения температур в точках 7,8,9 сходный с характером изменения температур в точках 4,5,6, что объясняется местом расположения этих точек относительно УОВ. Точки измерения параметров воздуха 4,5,6 и 7,8,9 располагаются в центральной части исследуемой

зоны горной выработки, так же как и экспериментальная УОВ. Характер изменения температур в этих точка в ходе эксперимента объясняется описанной во втором разделе схемой течения охлажденного воздуха на выходе из УОВ и его перемешивания с нагретым потоком воздуха в горной выработке.

На рисунке 3.13 приведена усредненная температура серии из трех экспериментов в точках 10,11,12.

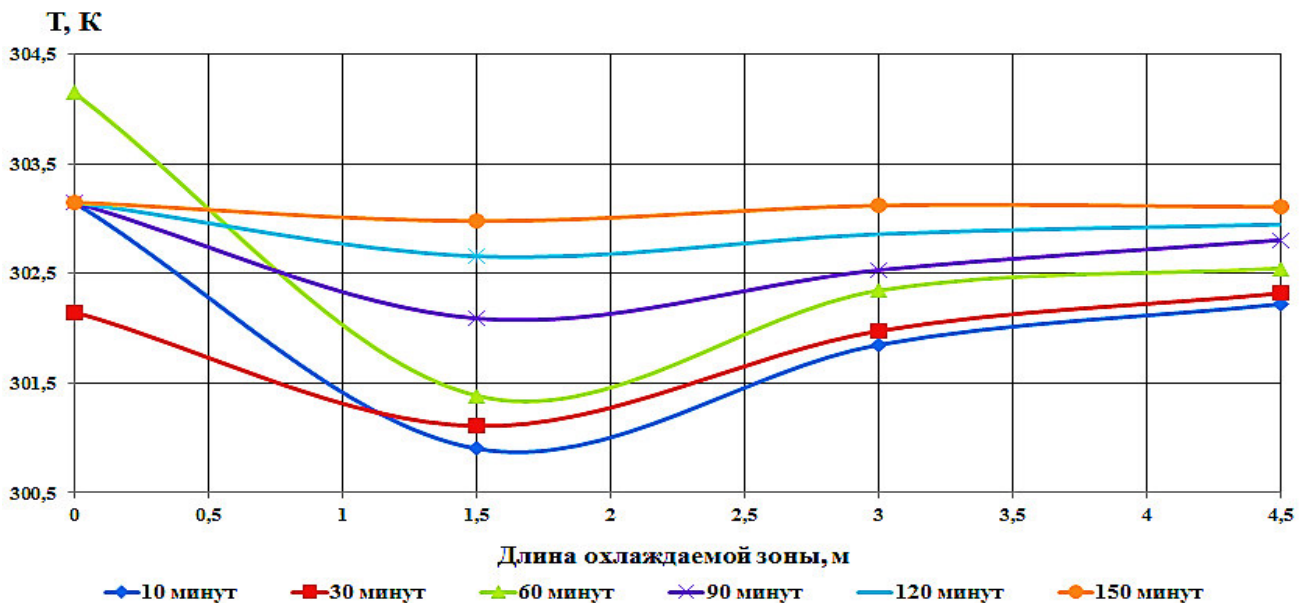


Рисунок 3.13 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 10,11,12

Из рисунка 3.13 видно, что характер изменения температур в точках 10,11,12 сходный с характером изменения температур в точках 1,2,3, что объясняется местом расположения этих точек относительно УОВ. Несмотря на то, что в измерительных точках фиксировалось снижение температуры, она оставалась выше предельно допустимой и не удовлетворяла требования НПАОТ 10.0-1.01-16.

Из анализа экспериментальных данных видно, что зона защитного действия УОВ с течением времени уменьшается. Уменьшение зоны действия связано с тем, что температура АХ в ходе испытаний постепенно повышается от 253,15 К до температуры окружающей среды. Для нахождения ширины защищаемой зоны был использован метод линейной интерполяции температур

воздуха. Для определения ширины зоны где обеспечивалась температура $\leq 299,15$ К была выполнена линейная интерполяция значений температуры между точками 1-4; 2-5; 3-6; 7-10; 8-11; 9-12 (см. рисунок 3.9). Результаты, полученные при линейной интерполяции значений температуры полученных в ходе эксперимента, приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11.

Ширина зоны защитного действия УОВ

T, мин	L ширина зоны на замерной станции № 1, м	L ширина зоны на замерной станции № 2, м	L ширина зоны на замерной станции № 3, м
10	2,64	2,49	2,40
30	2,60	2,41	2,28
60	2,40	2,20	2,06
90	2,18	2,00	1,70
120	1,87	1,58	1,23
150	1,26	-	-

Для графического представления данных занесенных в таблицу 3.11, результаты линейной интерполяции приведены ниже в виде графика (рисунок 3.14) по длине и ширине охлаждаемой зоны, на котором показано изменение зоны горной выработки, в которой обеспечивалась температура $\leq 299,15$ К в ходе эксперимента.

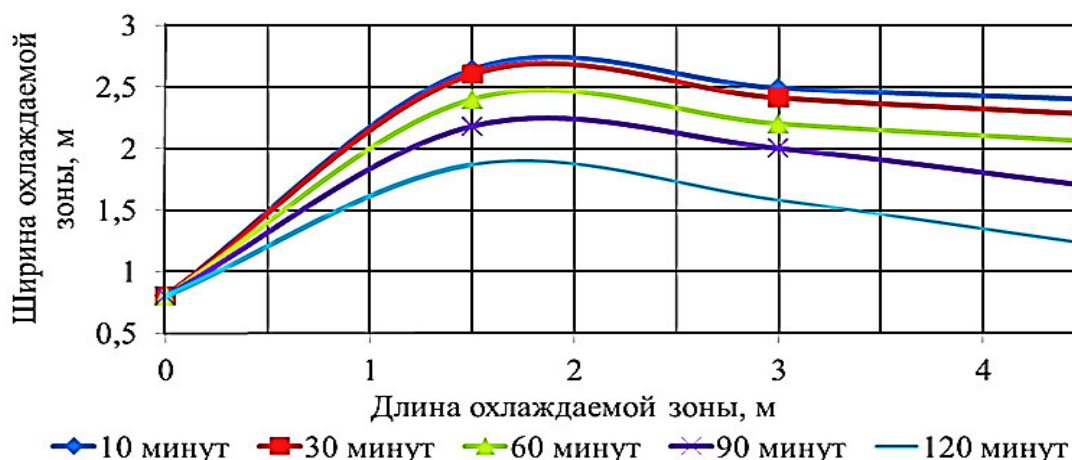


Рисунок 3.14 – График изменения зоны действия УОВ

3.4 Обоснование размеров локальной рабочей зоны с нормативными параметрами температуры воздуха и время ее существования

При струйном истечении охлажденной струи из вентиляционный трубопровод с большой скоростью она попадает в спутный поток нагретого воздуха и постепенно смешивается с ним. Часть струи имеет ядро течения с постоянной скоростью от конца трубы до полного разрушения ядра и называется начальным участком x_n .

Размывание струи за пределами начального участка ($x > x_n$) приводит к ее утолщению и падению скорости вдоль оси. Такой участок струи является основным.

Для установления дальнобойности и закономерностей распада струи охлажденного воздуха будем исходить из теории движения газожидкостных систем [53]. На основании общих представлений и известных экспериментальных данных, схему движения и распада струи можно изобразить в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

Будем считать, что до распада струи можно пренебречь силами гравитации, благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтем, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения холодной струи с нагретым воздухом, но и бокового трения струи о нагретый воздух.

Тогда при отсутствии фазовых превращений уравнение нестационарного относительного движения одиночной струи можно представить в виде [54]

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -(\lambda S_6 + \zeta S) \rho_0 \frac{w^2}{2V}, \quad (3.29)$$

где ρ – переменная плотность воздуха, кг/м³;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³;

w – продольная скорость движения струи, м/с;

τ – время с момента вылета холодной струи из «УОВ, с;

λ – коэффициент бокового трения струи о воздух, 1;

ζ – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, 1;

S_6 – площадь боковой поверхности струи, м²;

S – площадь поперечного сечения струи в головной ее части, м²;

V – объем охлажденного воздуха на участке действия струи, м³.

Уравнение (3.29) предназначено для определения изменения скорости дальноточности холодной струи при начальном условии

$$w(0) = w_0, \quad (3.30)$$

где w_0 – начальная скорость истечения струи, м/с.

Для получения аналитического решения задачи будем считать все параметры, входящие в уравнение (3.29), заранее известными величинами, за исключением искомой функции скорости w .

Так как объем струи равен $V = \pi L d^2 / 4$, а боковая поверхность струи $S_6 = \pi L d$, то их отношение можно представить как $S_6 / V = 4 / d$. Подставляя эту формулу в уравнение (3.29) и пренебрегая лобовым сопротивлением по сравнению с боковым сопротивлением, вместо (3.29) получим

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -2\lambda \rho_0 \frac{w^2}{d}, \quad (3.31)$$

где d – диаметр струи, м.

Принимая $\rho = \rho_0$, разделим переменные в уравнении (3.31) и получим

$$\frac{dw}{w^2} = -2\lambda d\tau / d. \quad (3.32)$$

Решение уравнения (3.32) имеет вид

$$\frac{1}{w} = -2\lambda\tau/d + A, \quad (3.33)$$

где $A = 1/w_0$ – константа интегрирования, с/м.

Подставляя значение константы интегрирования в формулу (3.33), получим

$$w = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau/d}, \quad (3.34)$$

где безразмерный коэффициент $C = 2\lambda$.

Анализ полученного решения (3.34) показывает, что скорость движения струи будет уменьшаться по сравнению с начальным ее значением.

Для определения дальности x продвижения холодной струи воздуха используем зависимость (3.34) и после интегрирования получим

$$x = \int_0^{\tau} w(\tau) d\tau = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau/d). \quad (3.35)$$

Из анализа полученной зависимости следует, что дальность продвижения холодной струи воздуха в большой степени зависит от ее начальной скорости и от диаметра выходного отверстия УОВ.

При больших скоростях движения струи возникающая разность давлений в лобовой и кормовой частях струи стремится ее деформировать и сжать. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи с течением времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания струи, приводящие к ее распаду. Взаимодействие охлажденного воздуха с окружающим нагретым воздухом на границе их раздела можно описать уравнением вида [55]

$$2\mu \frac{dR}{d\tau} = R \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right], \quad (3.36)$$

где μ – коэффициент турбулентной динамической вязкости охлажденного воздуха на границе контакта с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

R – текущий радиус поперечного сечения струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения холодной струи, Па·м;

R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны головной части струи, м.

Из уравнения (3.36) следует, что изменения площади или радиуса поперечного сечения струи происходят в результате аэродинамического сопротивления движению, которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому динамическому воздействию на струю противостоит сила поверхностного натяжения струи.

Определим главные радиусы кривизны холодной струи воздуха для сильно вытянутого эллипсоида. В этом случае главные радиусы кривизны в направлении движения струи R_1 и поперек ее движению R_2 соответственно определяются по формулам

$$R_1 = \frac{2R^2}{L}; \quad R_2 = \frac{L^2}{4R}, \quad (3.37)$$

где L – длина струи до распада, м.

Так как объем струи равен $V = \pi R^2 L$, откуда длина струи $L = \frac{V}{\pi R^2}$, то подставляя это выражение в формулы (3.37), получим

$$R_1 = \frac{2\pi R^4}{V}; \quad R_2 = \frac{V^2}{4\pi^2 R^5}. \quad (3.38)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения струи $S = \pi R^2$, то

вместо уравнения (3.36) будем иметь

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2.5}}{\pi^{0.5} V^2} \right) \right]. \quad (3.39)$$

Анализ полученного уравнения (3.39) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части струи будет тем больше, чем меньше турбулентная вязкость воздуха. При большой вязкости головная часть струи при движении почти не изменит своей формы. В то же время при малой вязкости воздуха форма струи будет сильно меняться, и в установившемся режиме каждой скорости будет соответствовать своя форма струи. Предположим, что до распада струи ее длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($R_1 \gg R_2$). Тогда уравнение (3.39) можно упростить и представить в виде

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (3.40)$$

Этому уравнению эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{d\tau} = A(\tau)S - B, \quad (3.41)$$

коэффициенты которого равны

$$A(\tau) = \zeta \rho \frac{w^2}{2\mu}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu}. \quad (3.42)$$

Полагая $A(0) = A_0 = \zeta \rho \frac{w_0^2}{2\mu}$ решение уравнения (3.41) представим в виде

$$S(\tau) = \exp(A_0\tau) \left\{ S_0 - \frac{B}{A_0} [1 - \exp(-A_0\tau)] \right\}. \quad (3.43)$$

При полной деформации струи и больших ее вибрациях происходит окончательный ее распад. Будем считать, что распад струи происходит тогда, когда площадь ее поперечного сечения достигает максимально возможного значения. Это значение можно вычислить, полагая радиус боковой кривизны намного меньше радиуса фронтальной кривизны ($R_2 \ll R_1$). Тогда при равновесии сил кинетической энергии струи и сил поверхностного натяжения из уравнения (3.40) получим:

$$\lambda\rho \frac{w_0^2}{2} = \sigma \frac{4S_m^{2,5}}{\pi^{0,5}V^2}, \quad (3.44)$$

откуда найдем максимально возможную площадь $S_1 = S_m$ поперечного сечения струи

$$S_1 = \left[\pi^{0,5} \lambda\rho \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0,4}. \quad (3.45)$$

Этой площади должно соответствовать определенное время распада струи и ее скорость. Так, из выражения (3.44) найдем время распада струи τ_m , по формуле:

$$\tau_m = \frac{1}{A_0} \ln \left(\frac{S_1 - B/A_0}{S_0 - B/A_0} \right), \quad (3.46)$$

и критическую скорость распада w_1 , м/с, по формуле

$$w_1 = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau_m/d}. \quad (3.47)$$

где C – эмпирическая константа.

Для расчета дальнобойности сплошной части струи охлажденного воздуха используем формулу (3.47) и получим

$$x_m = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau_m/d). \quad (3.48)$$

Таким образом, расчетным путем можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи воздуха, а также дальнобойность сплошной и распыленной струи.

Для проверки справедливости полученных результатов теоретических исследований проведен комплекс лабораторных и опытно-промышленных испытаний на разработанной экспериментальной УОВ (рисунок 3.2). Схема проведения опытно-промышленных испытаний приведена на рисунке 3.10.

Как видно из рисунка 3.9 в ходе опытно-промышленных испытаний замеры параметров воздуха в рабочей зоне производились в специально оборудованных замерных станциях на расстоянии 1.5; 3.0 и 4.5 м от вентиляционный трубопровод УОВ по ходу движения воздушной струи в двенадцати точках. Из показаний замеров параметров воздуха видно, что в точках 1,2,3 (рисунок 3.10) и в точках 10,11,12 (рисунок 3.14) температура воздуха в ходе испытаний оставалась выше предельно допустимой. В замерных точках 4,5,6 (рисунок 3.11) и в точках 7,8,9 (рисунок 3.12) температура воздуха на протяжении всех экспериментов оставалась в допустимых ПБ пределах.

Из анализа рисунков 3.11 и 3.12 следует, что температура воздуха в одних и тех же промежутках времени в точках 4 и 7; 5 и 8; 6 и 9 практически равна, для упрощения произведем усреднение показаний температур воздуха в указанных точках (таблица 3.12.).

Усредненные показания температуры воздуха

$t_{\text{на вх. в УОВ}}, \text{ К}$	$t_{\text{cp}(4,7)}, \text{ К}$	$t_{\text{cp}(5,8)}, \text{ К}$	$t_{\text{cp}(6,9)}, \text{ К}$
303,2	292,7	293,6	296,5
303,2	293,3	293,9	296,6
302,2	293,7	294,6	296,8
303,2	294,3	295,0	297,1
304,2	294,7	295,7	297,5
304,2	295,3	296,1	297,8
304,2	295,8	296,7	298,1
303,2	296,1	297,1	298,6
303,2	296,5	297,7	299,0
303,2	297,0	297,9	299,3
304,2	297,4	298,2	299,5
303,2	298,2	298,9	300,0
303,2	298,7	299,6	300,1
303,2	299,3	300,0	300,5
303,2	299,9	300,4	301,0

Анализ экспериментальных данных показывает, что стабилизация температуры воздуха на выходе из установки происходит в первые пять минут от начала работы, после чего начинается ее плавный рост на протяжении восьмидесяти минут. После восьмидесятой минуты от начала работы установки наблюдается более интенсивный рост температуры воздуха на выходе из нее.

Анализ зависимости (3.41) избыточной температуры от избыточной скорости показывает, что она не только не отражает физической сущности процессов теплообмена, но имеет большие погрешности при расчетах.

Поэтому рассмотрим стационарный процесс теплообмена в горной выработке без учета термодиффузии, описываемый первым уравнением (3.47) и имеющим вид:

$$w \frac{dT}{dx} = b(T_1 - T), \quad (3.49)$$

где T_1 – температура в горной выработке, К.

Подставляя в уравнение (3.49) формулу для расчета скорости струи воздуха (3.47), получим

$$\frac{dT}{dx} = \frac{1 + Cx/d}{w_0} b(T_1 - T). \quad (3.50)$$

В данном случае за расстояние принято $x = w_0 \tau$.

После интегрирования уравнения (3.50) получим

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp\left(-\frac{x + Cx^2/2d}{w_0} b\right), \quad (3.51)$$

где T_0 - температура на выходе из УОВ, К.

Анализ полученного решения (3.51) показывает, что при $x = 0$ температура на выходе из УОВ равна $T = T_0$, а при удалении от нее на расстояние в 4,5 метра, она приближается к температуре в горной выработке и тем быстрее, чем больше параметр b .

Для упрощения произведем усреднение показаний температур воздуха (на каждой замерной станции по четырем точкам замера), по истечению 10 минут с начала работы УОВ (рисунок 3.15).

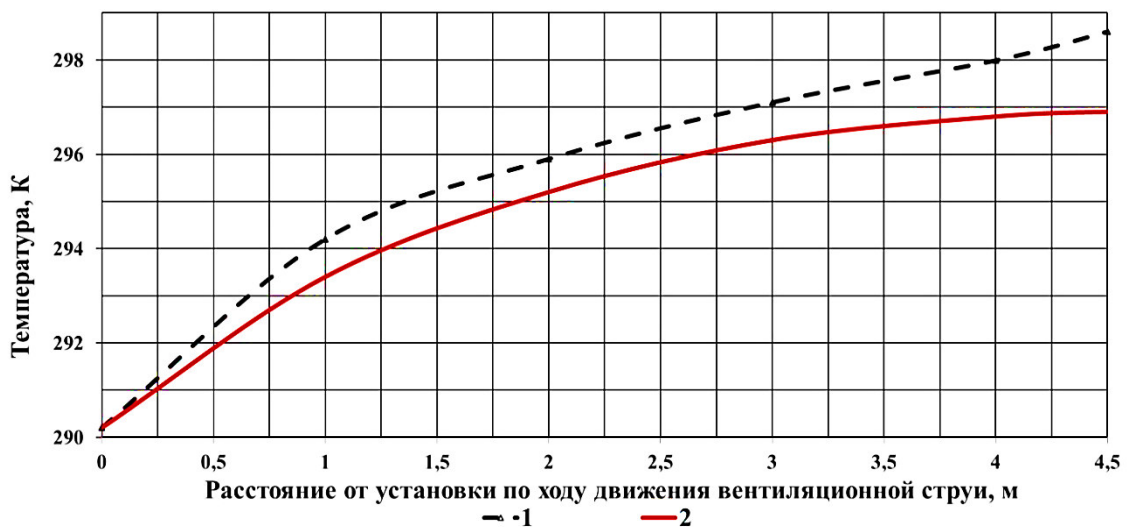


Рисунок 3.15 – График изменения температуры воздуха по длине охлаждаемой зоны (10 минут с начала работы установки):

1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные.

Как показали результаты сравнения расчетных и экспериментальных данных (рисунок 3.15) наилучшего приближения между ними можно достичь при коэффициенте теплообмена $b = 0,1$ 1/с.

Таким образом, общая схема расчета такова. Задавшись исходными данными, определяем по формуле (3.51), как основной параметр, дальнобойность сплошной части струи охлажденного воздуха.

Выводы к разделу

Основными результатами экспериментальных исследований являются:

1. В ходе лабораторных и опытно-промышленных испытаний установлены зависимости между параметрами воздуха истекающего из вентиляционного трубопровода УОВ и параметрами воздуха в локальной рабочей зоне. Сравнение полученных экспериментальных данных с разработанной математической моделью закономерности движения охлажденного воздуха показали высокую сходимость результатов.
2. На основе разработанной математической модели изучены процессы заполнения охлажденной струей локальной рабочей зоны, с повышенной температурой воздуха в зависимости от параметров истекающей струи из УОВ.
3. Получена аналитическая зависимость дальности подачи охлажденной воздушной струей в зависимости ее параметров. Адекватность математической модели подтверждена результатами лабораторных и опытно-промышленных испытаний.
4. Раскрыт механизм взаимодействия охлажденной струи воздуха истекающей из вентиляционного трубопровода УОВ и нагретым спутным потоком воздуха движущегося по горной выработки.

РАЗДЕЛ 4

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА
ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ЛОКАЛЬНОЙ
РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

4.1 Методика расчета параметров установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Расчет параметров УОВ, в том числе определение количества АХ выполняются в зависимости от времени защитного действия.

Целью расчета является определение:

- температуры в УОВ по ее длине;
- скорости воздуха на выходе из УОВ;
- коэффициента скорости распада струи охлажденного воздуха;
- диаметра отверстия (вентиляционный трубопровод) на выходе из УОВ;
- времени распада струи охлажденного воздуха;
- дальности подачи струи охлажденного воздуха;
- температуры воздуха на различном расстоянии от УОВ по ходу движения струи охлажденного воздуха.

Исходные данные для расчета:

T – температура воздуха в установке, К;

T_0 – начальная температура воздуха в горной выработке, К

T_1 – температура воздуха на выходе из УОВ, К;

x – расстояние от входа в УОВ, м;

L – длина УОВ, м;

Q – расход воздуха через УОВ, м³/с;

w – скорость воздуха на выходе из УОВ, м/с;

S – площадь поперечного сечения выработки, м²;

S_0 – площадь выходного отверстия из УОВ, м².

Порядок расчета:

1. Находим температуру воздуха по длине УОВ

$$T = T_0 \cdot \exp\left(\frac{-0.05 \cdot x}{L}\right) \quad (4.1)$$

2. Находим скорость воздуха на выходе из УОВ

$$w = \frac{Q}{S_0} \quad (4.2)$$

3. Определяем коэффициент скорости распада струи охлажденного воздуха

$$A = 0.16 \cdot w^2 \quad (4.3)$$

4. Находим диаметр вентиляционного трубопровода на выходе из УОВ

$$d = 2 \cdot \left(\frac{S}{\pi}\right)^{0.5} \quad (4.4)$$

5. Определяем время распада струи охлажденного воздуха

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{S}{S_0}\right)}{A} \quad (4.5)$$

6. Находим дальность подачи струи охлажденного воздуха

$$x = 5 \cdot d \cdot \ln\left(\frac{1 + 0.2 \cdot w \cdot \tau}{d}\right) \quad (4.6)$$

7. Определяем температуру воздуха в зависимости от расстояния до УОВ

$$T = T_0 - (T_0 - T_1) \cdot \exp\left(\frac{-0.1 \cdot x}{w}\right). \quad (4.7)$$

Если ожидаемая температура на заданном расстоянии превышает допустимую 299 К, то необходимо либо приблизить УОВ к месту ведения горноспасательных работ, либо увеличить скорость воздуха на выходе из УОВ.

4.2 Разработка тактики и обоснование возможной области применения установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Цель создания УОВ – снижение температуры рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок во время аварийно-восстановительных, ремонтных и горноспасательных работ до установленной Правилами безопасности в угольных шахтах (не более 299 К).

Конструкция УОВ должна быть блочной. Конструкция блоков должна предусматривать как автономное применение, так и объединение в батареи. Состав УОВ и назначение ее функциональных модулей приведен в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Состав УОВ и назначение функциональных модулей

Наименование модуля	Количество единиц	Назначение модуля
корпус теплоизолированный	1	изоляция внутреннего объема УОВ от притоков тепла извне и утечек холода наружу
перфорированная полка	8	размещение АХ в теплообменных камерах теплоизолированного корпуса
воздухонепроницаемая перегородка	2	разделение внутреннего объема УОВ на теплообменные камеры и исключение утечек между ними
проем воздухонепроницаемой перегородке	2	сообщение теплоизолированных камер для перетекания охлаждаемого воздуха
аккумулятор холода	500	охлаждение воздуха (источник холода)
вентилятор местного	1	продувка воздуха через УОВ

Наименование модуля	Количество единиц	Назначение модуля
проветривания		
шибер	1	регулирование скорости продуваемого воздуха через камеры УОВ
гибкий вентиляционный трубопровод	2	соединение вентилятора местного проветривания с теплоизолированным корпусом УОВ, а так же направление исходящего с УОВ воздуха в рабочую зону
быстроразъемное соединение (накидной замок для мягких труб)	1	крепление гибкого трубопровода на корпусе вентилятора местного проветривания
люк	2	герметизация внутреннего пространства УОВ вне рабочее время

Схема экспериментального образца УОВ (продольное сечение) с основными габаритными размерами представлена на рисунке 4.1.

Для подготовки УОВ к работе вручную открываются крышки 7 люков 5 и 6, вмонтированных в боковые стенки 3, 4 корпуса 1 с теплоизолирующим слоем 2. Посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20 вентилятор местного проветривания соединяется с входным люком УОВ 3 при этом регулирование объема воздуха попадающего в теплообменные камеры осуществляется шибером 24. В случае когда в горной выработке отсутствует стационарная подача воздуха (ВМП которые проветривает забой тупиковой выработки и т.д.) для продувания используется ВМП 25 поставляемый вместе с УОВ. Поток охлаждаемого воздуха по трубопроводу 20 подается через входной люк 3 в верхнюю теплообменную камеру 12, где разделяется на отдельные потоки, которые перемещаясь вдоль верхней стенки 8 и расположенных на направляющих 13 перфорированных полок 14, контактируют с поверхностью ячеек АХ 15, размещенных на полках 14. Выполнение полок 14 перфорированными (решетчатыми) обеспечивает наиболее полный контакт воздуха с ячейками 15.

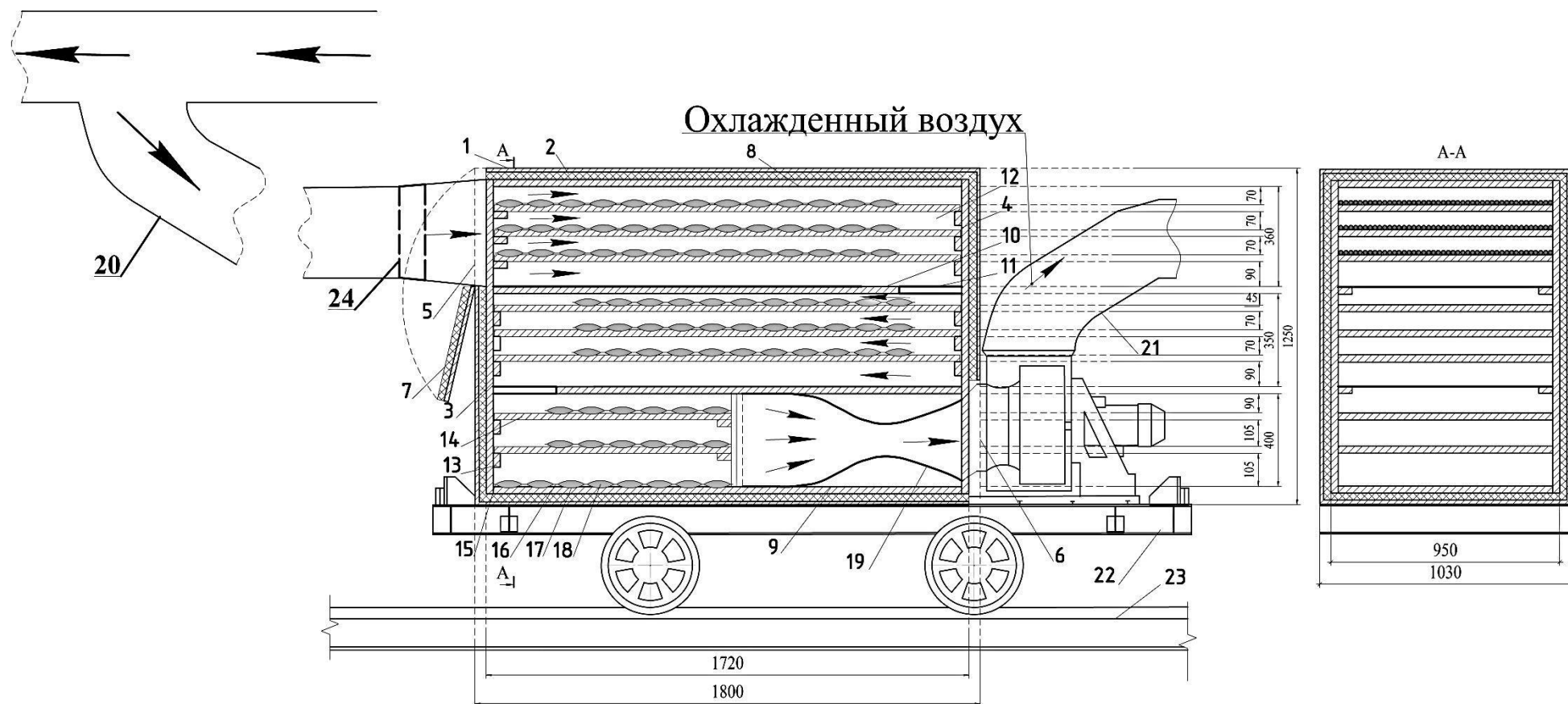


Рисунок 4.1 – Схема экспериментального образца УОВ с основными габаритными размерами (продольное сечение).

Двигаясь вдоль ячеек АХ в виде вытянутого эллипсоида вращения и проходя места пережимов 16, воздушный поток обтекает их, в результате чего возникает его завихрение и поток приобретает турбулентность. По мере продвижения турбулентного потока воздуха по теплообменной камере и его контакта с поверхностью ячеек АХ происходит постепенное охлаждение воздуха. Турбулентное движение потока воздуха наряду со значительной площадью поверхности теплообмена и низкой температурой размещенного в ячейках 15 льдосоляной смеси 18 обеспечивают улучшение конвективного теплообмена, интенсифицируя процесс охлаждения. Размещение в ячейках льдосоляной смеси обеспечивает снижение его температуры плавления за счет того, что кроме процесса плавления также протекает процесс растворения соли в воде, сопровождаемый понижением температуры плавления льдосоляной смеси. Кроме снижения температуры плавления льдосоляной смеси также происходит увеличение длительности этого процесса, что приводит к увеличению длительности рабочего цикла УОВ и снижению температуры воздуха подаваемого в локальную рабочую зону.

Воздух из верхней теплообменной камеры 12 через проемы 11 воздухонепроницаемых перегородок 10 последовательно перетекает в нижележащие камеры и подвергается дальнейшему охлаждению. Попадая в нижнюю камеру и контактируя в процессе перемещения с АХ, размещенными на полках и поверхности нижней стенки 9, воздух направляется в выходное сопло 19, где происходит его дополнительное охлаждение за счет снижения абсолютной температуры и давления со значительным увеличением его скорости. Перемещаясь далее через воздушный трубопровод 21, с высокой скоростью интенсивно охлажденный поток воздуха поступает в горную выработку. При истечении охлажденного потока воздуха из воздушного трубопровода 21 с большой скоростью, он попадает в спутный поток нагретого воздуха горной выработки и постепенно смешивается с ним, охлаждая локальную рабочую зону значительного объема. Сниженная температура и увеличенная скорость воздушного потока на выходе из УОВ позволяют устойчиво нормализовать

микроклимат по тепловому фактору при температуре спутного потока нагретого воздуха в выработке до 32 °С со скоростью до 2 м/с на расстоянии до 6 м.

Теплоизолированный корпус УОВ должен удовлетворять следующим требованиям:

- исключать утечки воздуха между отсеками и за его пределы;
- размещать в теплообменных камерах 500 шт. АХ;
- предусматривать сообщение отсеков проемами для прохода воздуха, площадь которых, должна быть одинакова;
- на входе в УОВ конструкцией должно быть предусмотрено устройство для регулировки скорости подачи воздуха;

Выдвижные полки должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечить ориентацию потока воздуха с АХ;
- выдерживать нагрузку, создаваемую весом аккумуляторов холода;

Гибкий вентиляционный трубопровод необходим для соединения УОВ с вентилятором местного проветривания, а так же для направления (подачи и транспортировки) охлажденного воздуха непосредственно на рабочее место. В зависимости от типа вентилятора местного проветривания (далее ВМП) следует применять трубопровод диаметром 0,6 или 0,8 м. Вентиляционный трубопровод должен соединяться с ВМП с помощью быстроразъемного соединения (накидного замка для мягких труб).

ВМП может применяться как с электрическим, так и с пневматическим двигателем, должен иметь номинальную подачу от 1,5 до 4,5 м³/с. ВМП при эксплуатации может размещаться в подвешенном состоянии (подвешивается к крепи горной выработки) или на шахтной платформе типа «П-2,5-02» и иметь для этого приспособления.

УОВ может быть применена:

- 1) в условиях локальных зон (на расстоянии до 4,5 м) горных выработок глубоких шахт (непосредственно на рабочих местах);

2) в технологических зонах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов (более 100 кВт) создающих значительные техногенные тепловые потоки;

3) при устранении последствий аварии или инцидента (стыковка конвейерной ленты и т.д.);

4) при выполнении горноспасательных работ (проведению специальных поисковых выработок и т.д.).

Охлаждаемый воздух должен удовлетворять требованиям таблицы 4.2.

Таблица 4.2.

Основные требования к охлаждаемому воздуху

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура, К	от 299,15 до 308,15
2	Относительная влажность, %	до 100
3	Запыленность, мг/м ³	до 100
4	Барометрическое давление, МПа	от 0,097 до 0,12
5	Скорость движения воздуха в локальной зоне горной выработки, м/с	от 0,2

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований получена техническая характеристика установки (Таблица 4.3).

Таблица 4.3.

Основные технические требования к установке охлаждения воздуха

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура воздуха на выходе (10-150 мин.), К при температуре рудничного воздуха на входе $T = 305 - 306$ К, расход воздуха $0,5$ м ³ /с, температуре аккумуляторов холода (начальной) $T \leq 299$ К	290-299
2	Скорость движения воздуха на выходе, м/с, не более	4
3	Время подготовки к работе, мин., не более	15
4	Масса (без вентилятора), кг, не более	150
5	Габаритные размеры (без вентилятора), м, ширина/длина/высота не более:	1,1/2,0/1,3

Конструкцией УОВ должны обеспечиваться удобство транспортирования и монтажа, эргономичность при осуществлении технического обслуживания и эксплуатации для чего должны быть предусмотрены:

- стропные устройства или конструктивные элементы (места) для захвата грузоподъемными средствами, используемыми в процессе транспортировки и монтажа. Строповые устройства или предусмотренные для строповки конструктивные элементы УОВ, а также съемные захватные приспособления должны быть рассчитаны и испытаны на подъемную массу, учитывающую массу оборудования, конструктивных элементов закрепленных на установке до его подъема и установки в проектное положение на месте эксплуатации;
- приспособления для транспортирования на шахтной платформе типа «П-2,5-02», или для перемещения четырьмя рабочими вручную;
- на месте эксплуатации УОВ может размещаться на платформе, на почве или в подвешенном состоянии и иметь приспособления для крепления.

Для УОВ должны быть выполнены следующие требования по надежности:

- срок службы 5 лет;
- коэффициент технического использования не менее 0,85;
- наработка до отказа, не менее 1000 часов.

4.3 Расчет годового экономического эффекта от внедрения установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Общий годовой экономический эффект от внедрения результатов работы носит двойственный характер [56, 57]: с одной стороны речь должна идти об оценке экономической эффективности от внедрения УОВ, а с другой – с позиции социальной.

Как отмечено в работах [58, 59] «Затраты на охрану труда будут экономически обоснованными, если снижение материальных потерь от травматизма, заболеваемости и производных вредностей выше или равно средствам, использованных на охрану труда».

Особенностью определения экономической эффективности проекта, связанных с созданием благоприятных условий труда, является наличие так называемой социальной эффективности [60,61], которая определяется

повышением уровня производительности труда за счет снижения потерь рабочего и свободного времени, а так же экономией расходов на выплаты (компенсации за неблагоприятные условия труда).

Учитывая, что одним из условий выполнения экономического обоснования является многовариантность, блок схема экономического обоснования предлагаемой УОВ, для улучшения климатических условий во время ведения аварийных работ на шахтах, а также при выполнении некоторых горноспасательных работ будет иметь вид (рисунок 4.2).

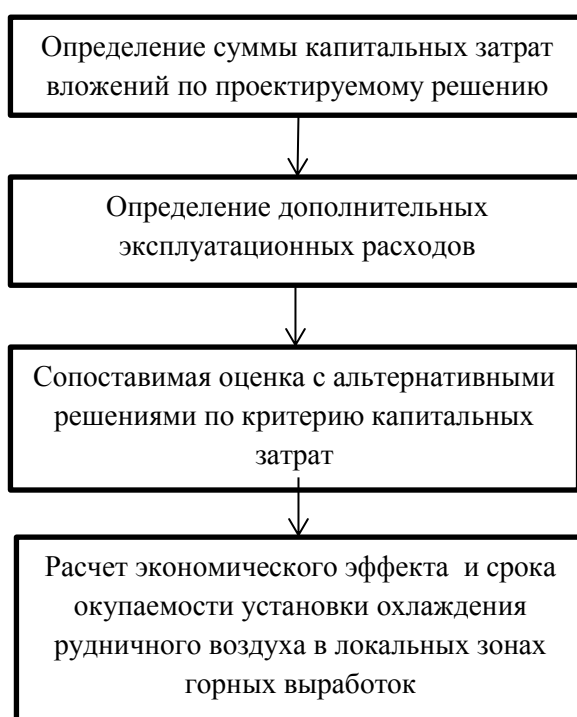


Рисунок 4.2 – Блок-схема определения экономической эффективности внедрения УОВ

Этап 1. Определение суммы капитальных затрат по проектируемому решению.

УОВ может частично комплектоваться охлаждающими элементами ОЭ-2 и комплексом УВМН находящимися на вооружении ГВГСС МЧС ДНР и выпускается Механическими мастерскими МЧС ДНР. Капитальные вложения для проверки работоспособности разработанного экспериментального образца УОВ, согласно смете составляют 25 000 рос. руб.

Этап 2. Определение дополнительных эксплуатационных расходов.

Как отмечено в работе [62] среднее число применений противотепловой одежды горноспасателями равно пять случаев в год, следовательно, среднее число применений разработанной УОВ, при эксплуатации ее ГВГСС МЧС ДНР также можно принять за пять раз в год.

По данным [62 с. 61] средняя длительность ликвидации одной аварии составляет 36,6 ч. Из-за отсутствия технической возможности изготовить разработанные АХ в достаточном объеме, принято решение во время экспериментальных исследований применить в качестве АХ ОЭ-2 конструкции НИИГД «Респиратор». Для заморозки ОЭ-2, проектом предусматривается применение комплекса УВМН. Техническая характеристика комплекса УВМН приведена в табл. 4.4.

Таблица 4.4.

Техническая характеристика комплекса УВМН

№ п/п	Наименование показателей	Единица измерения	УВМН
1	Хладоноситель		сжатый воздух
2	Способ получения холода		расширение воздуха в турбодетандере
3	Производительность	ОЭ-2 в час	190-270
4	Диапазон минимальной температуры хладоносителя при входе в холодильную камеру	°С	минус 16-22
5	Стоимость хладоносителя	рос.руб./м ³	0,95
6	Расход хладоносителя на цикл заморозки	м ³ /мин воздуха	25
7	Срок службы, не менее	лет	10

Экспериментально установлено, что время защитного действия УОВ составляет 150 минут при загрузке в теплообменные камеры 500 ОЭ-2. Таким образом, можно сделать вывод, что для снабжения одной УОВ ОЭ-2 достаточно иметь на вооружении один комплекса УВМН.

Затраты на заморозку ОЭ-2 комплексом УВМН:

$$C = n_{ц,у} \cdot S_{з.ОЭ-2} \cdot K_c \cdot K_{з.с}, \quad (4.8)$$

где C – затраты на заморозку ОЭ-2 для одной УОВ комплексов УВМН в год;

$n_{ц,у}$ – количество рабочих циклов УОВ в год = 74 (5 применений по 36,6 часов, длительность одного цикла 2,5 часа);

$S_{з.ОЭ-2}$ – стоимость заморозки ОЭ-2 комплексов УВМН на один рабочий цикл УОВ = 2850 рос. руб.;

K_c – коэффициент спроса = 1;

$K_{з.с}$ – коэффициент загрузки оборудования = 0,95.

$$C = 74 \cdot 2850 \cdot 1 \cdot 0,95 = 200\,355, \text{ рос. руб./год.}$$

Затраты на материалы:

Основным расходным материалом для обеспечения функционирования разработанной УОВ являются водо-ледяные охлаждающие элементы ОЭ-2. По данным [63] количество повторных применений ОЭ-2 при их замораживании в камерах с температурой минус (15...20) °С равно от 12 до 15 раз. В настоящее время стоимость одного ОЭ-2 составляет 17 рос. руб. /шт.

$$S = n_{ОЭ-2} \cdot a = 2700 \cdot 17 = 45900 \text{ рос. руб./год,} \quad (4.9)$$

где S – затраты на охлаждающие элементы ОЭ-2 в год, рос. руб./год;

$n_{ОЭ-2}$ – количество расходуемых ОЭ-2 в год = 2700 шт., (74 рабочих цикла УОВ 12 повторных заморонок ОЭ-2, в теплообменные камеры одномоментно помещается 500 ОЭ-2);

a – стоимость ОЭ-2 = 17 рос. руб. /шт.

Для прокачки воздуха через УОВ проектом предусматривается применение вентилятора ВЦ-4-70-№5.

Затраты на электроэнергию потребляемую ВЦ-4-70-№5:

$$E = M_y \cdot F_c \cdot K_c \cdot C_{\text{эл.ч}} \cdot K_{\text{з.с}} = 4 \cdot 183 \cdot 1 \cdot 1,42 \cdot 0,95 = 988 \text{ рос. руб./год.}, (4.10)$$

где E – затраты на силовую электроэнергию, рос. руб./год;

M_y – общая установленная мощность электродвигателей, кВт = 4;

F_c – действительный годовой фонд времени работы единицы оборудования, час = 183 (5 применений по 36,6 часов);

K_c – коэффициент спроса = 1;

$C_{\text{эл.ч}}$ – стоимость одного кВт-часа силовой электроэнергии = 1,42 рос. руб.;

$K_{\text{з.с}}$ – коэффициент загрузки оборудования = 0,95.

Затраты на капитальный и текущий ремонт:

Затраты на капитальный и текущий ремонт оборудования и транспортных средств для промышленных предприятий принимаются на уровне 6 % от стоимости основного оборудования, что составит:

$$Z_{\text{к.р.}} = 25000 \cdot 0,06 = 1500 \text{ рос. руб.}$$

где $Z_{\text{к.р.}}$ – затраты на капитальный и текущий ремонт УОВ.

Таким образом дополнительные эксплуатационные затраты для ГВГСС МЧС ДНР, связанные с принятием на вооружение УОВ составят 248 743 рос. руб в год.

Этап 3. Сопоставимая оценка с альтернативными решениями по критерию капитальных затрат.

На сегодняшний день альтернативой разработанной УОВ может являться установки использующее эффект гидроэжекции, а также противотепловая одежда с конвективно-кондуктивной системой охлаждения типа ТК-50, ТК-60М.

Поскольку разработанная УОВ имеет в своем арсенале в качестве аккумулятора холода водяной лед (охлаждающие элементы ОЭ-2), а также тот факт, что ОЭ-2 используются горноспасателями в качестве аккумуляторов холода для противотепловой одежды, принимаем для альтернативной оценки противотепловую одежду конструкции НИИГД «Респиратор».

В работе [63 с. 41], годовой экономический эффект рассчитывается автором по следующей зависимости:

$$З_2 = \frac{m}{t'} (C'' + C''') = 120000 \text{ рос. руб.} \quad (4.11)$$

где m – количество костюмов, находящихся в подразделениях ГВГСС, ед.;

t' – срок службы костюмов, лет;

C'' – стоимость одного костюма, тыс. рос. руб.;

C''' – стоимость дезинфекции костюмов в год, рос. руб. /год.

Этап 4. Расчет экономического эффекта и срока окупаемости УОВ.

В соответствии с выполненными выше расчетами дополнительная прибыль от реализации проектных решений составит:

$$\Delta\Pi_{\text{год}} = 120000 - 25000 = 95000 \text{ рос. руб.}, \quad (4.12)$$

Следовательно, внедрение УОВ позволит улучшить климатические условия в локальной рабочей зоне горной выработки при ведении аварийных и в некоторых случаях горноспасательных работ. Применение УОВ при ведении аварийных работ на шахтах позволит повысить производительность и безопасность труда.

4.4 Требования безопасности при применении установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Спуск и подъем УОВ по вертикальным выработкам должны производиться в клетях.

Клетки должны иметь сплошные металлические открывающиеся крыши или крыши с открывающимся лазом, а также сплошной прочный пол. Длинные стороны (бока) должны обшиваться на полную высоту металлическими листами. Вдоль длинных сторон клеток должны быть устроены поручни. С коротких (торцевых) сторон клетки должны быть устроены двери или другие надежно ограждающие приспособления, предотвращающие возможность выпадения людей и оборудования из клетки. Конструкция дверей не должна допускать соскакивания их при движении клеток.

При транспортировке запрещается:

а) проталкивать несцепленные составы, прицеплять непосредственно к локомотиву платформы или вагонетки с длинномерными материалами, а также платформы и вагонетки, груженые лесом или оборудованием, выступающим за верхний габарит транспортных средств;

б) сцеплять и расцеплять вагонетки вручную во время движения состава, а также сцеплять и расцеплять крюковые сцепки без применения специальных приспособлений;

в) сцеплять и расцеплять вагонетки в наклонных выработках, в выработках с самокатным уклоном и на закруглениях;

г) оставлять подвижной состав на участках выработок, имеющих самокатный уклон;

д) формировать состав из вагонеток со сцепками разных типов;

е) проталкивать состав локомотивами с помощью стоек, распилов, досок, а также локомотивом, движущимся по параллельному пути;

ж) сцеплять и расцеплять вагонетки на расстоянии ближе 5 м от опрокидывателей, вентиляционных дверей или других препятствий;

з) применять для затормаживания и удержания подвижного состава подручные средства;

и) оставлять вагоны, составы или локомотивы на разминожках ближе 4 м от рамного рельса стрелочного перевода.

При откатке транспортными средствами с канатным приводом по наклонным выработкам должны быть предусмотрены приспособления, препятствующие скатыванию УОВ на нижние и промежуточные приемные площадки при обрыве каната, прицепного устройства или сцепки:

а) на верхних приемных площадках наклонных выработок с горизонтальными заездами должны устанавливаться задерживающие стопоры;

б) выше нижних приемных площадок должны устанавливаться предохранительные барьеры, оборудованные амортизирующими устройствами с автоматическим или дистанционным управлением. До оборудования наклонных выработок амортизирующими барьерами должны применяться съемные ловители вагонеток или предохранительные канаты и жесткие барьеры с дистанционным управлением.

в) ниже верхних приемных площадок, а также в заездах промежуточных выработок могут устанавливаться барьеры жесткого типа, прочность которых должна определяться расчетом. На нижних и промежуточных приемных площадках горизонтальных участков выработок должны устраиваться ниши для укрытия работающих и размещения пультов управления и связи. Запрещается во время работы подъемной установки передвижение людей по наклонным выработкам.

Во время работы подъемных установок в наклонных выработках вход на площадки, где производится сцепка и расцепка вагонеток, лицам, не участвующим в этой работе, запрещается. Должны быть вывешены соответствующие этому запрещению знаки.

При ручной подкатке на передней наружной стенке УОВ должен быть подвешен включенный специальный светильник. При уклонах более $0,01^\circ$ ручная подкатка запрещается.

При откатке транспортируемого оборудования бесконечным и концевым канатами должны применяться сцепные и прицепные устройства, не допускающие самопроизвольного расцепления, а при откатке бесконечным канатом в выработках с углом наклона более 18° , кроме того, контрканаты. Запрещается изготовление на шахтах сцепок вагонеток, прицепных устройств для откатки концевым и бесконечным канатами, а также локомотивных сцепок.

Эксплуатация и обслуживание УОВ, приборов и аппаратуры входящего в ее состав, а также их монтаж, демонтаж и хранение должны осуществляться в соответствии с требованиями технологических инструкций, разработанных на основании технической документации заводов-изготовителей с учетом производственных условий и требований Правил безопасности.

Нормируемые параметры должны выдерживаться на протяжении всего периода эксплуатации УОВ.

Движущиеся части УОВ должны быть ограждены. Ограждения должны поставляться комплектно с УОВ. Работа УОВ со снятым или неисправным ограждением запрещается. Ограждение движущихся частей должно быть стационарным.

К эксплуатации УОВ допускается только эксплуатационный и ремонтный персонал, подготовленный в соответствии с требованиями Правил безопасности.

На рабочих местах должны быть помещены таблички или выписки из технологических инструкций о порядке пуска (остановки) УОВ.

Инструменты и приспособления, используемые для обслуживания УОВ, должны соответствовать требованиям безопасности и выполняемой работы. Инструменты и приспособления, используемые во взрывопожароопасных зонах и помещениях, не должны давать искры при работе с ними.

Запрещается работа на неисправной УОВ, а также использование неисправных приспособлений и инструментов.

Прием и сдача смены должны сопровождаться проверкой:

а) исправности УОВ;

б) наличия и состояния ограждений, защитных блокировок, сигнализации, контрольно-измерительных приборов, заземления, средств пожаротушения;

в) исправности систем освещения и вентиляции (аспирации).

Результаты осмотра должны заноситься в журнал приема и сдачи смен. Обнаруженные неисправности должны быть устранены.

Перед началом работ все специалисты и рабочие, занятые в ремонте, должны изучить проект организации работ и пройти инструктаж по безопасности труда. Допуск персонала к работе должен производиться только с разрешения лица, ответственного за проведение ремонта.

В электрических схемах должна быть предусмотрена защита электроустановок от перегрузки и короткого замыкания, а также защита персонала от воздействия электрического тока и электромагнитного поля.

При работах, связанных с опасностью поражения электрическим током или воздействия электромагнитного поля, должны применяться средства защиты.

Работники, эксплуатирующие УОВ должны:

а) знать сигналы аварийного оповещения, правила поведения при авариях и план ликвидации аварий в соответствии со своим рабочим местом, запасные выходы, места расположения средств самоспасения и противоаварийной защиты и уметь пользоваться ими;

б) уметь пользоваться средствами коллективной и индивидуальной защиты;

в) знать и выполнять требования технических документов и нормативных актов по охране труда, касающиеся их профессии;

г) соблюдать требования по охране труда и промышленной безопасности, предусмотренные трудовым договором, правилами внутреннего трудового распорядка предприятия, Правилами безопасности в части, касающейся их трудовой деятельности;

д) знать руководства (инструкции) по эксплуатации машин, оборудования и изделий в пределах своей профессии (должности) и обслуживаемого им рабочего места;

е) проходить медосмотр, обучение, инструктажи и проверку знаний правил, норм и инструкций по безопасности труда;

ж) принимать меры по устранению опасных производственных ситуаций;

з) при необходимости оказывать помощь пострадавшим при несчастных случаях;

и) сообщать об опасностях непосредственному руководителю работ или горному диспетчеру;

к) сотрудничать с руководством шахты и инженерно-техническими работниками в обеспечении безопасных и здоровых условий труда.

Работнику запрещается самовольно выполнять работы, не относящиеся к полученному наряду (заданию) и его обязанностям, за исключением случаев, когда такие работы необходимо выполнять, чтобы предотвратить вероятную аварию или угрозу здоровью или жизни людей.

В течение всей смены бригадир, звеньевой, рабочий должны следить за безопасным состоянием места работы, исправностью обслуживаемого оборудования и приспособлений, средств защиты и контроля.

При обнаружении признаков опасности бригадир, звеньевой, рабочий должны немедленно прекратить работу, предупредить товарищей и уйти в безопасное место, сообщив об этом сменному инженерно-техническому работнику или горному диспетчеру.

По окончании смены (если нет перерыва между сменами) бригадир, звеньевой, рабочий обязаны передать прибывшим на смену свои рабочие места, УОВ и приспособления в безопасном состоянии, а при наличии перерыва между сменами они обязаны сдать свои рабочие места сменному горному мастеру. Сменный горный мастер должен сообщить о состоянии рабочих мест руководителю или ИТР участка, который оформляет наряд на следующую смену.

Выводы к разделу

1. Разработана методика расчета параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки.

2. Установлено, что разработанная УОВ может обеспечивать высокую мобильность, малое время выхода на рабочий режим, широкий диапазон регулирования параметров исходящего из установки воздуха, простую и надежную конструкцию.

3. Получены технические характеристики, разработана тактика применения УОВ при ведении аварийно-восстановительных, ремонтных и горноспасательных работ, а также в местах размещения энергоемкого горнопромышленного оборудования.

4. Годовой экономический эффект от реализации проектных решений в соответствии с выполненными выше расчетами составит 95000 рос. руб. Вместе с тем, следует отметить, что в рамках диссертационной работы не рассчитывался экономический эффект от повышения уровня производительности труда, а так же экономии расходов на выплаты (компенсации за неблагоприятные условия труда).

5. Определены требования техники безопасности при транспортировке и эксплуатации УОВ в горных выработках глубоких шахт.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской квалификационной работой, в которой на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований дано решение актуальной научно-технической задачи по нормализации температурного режима в локальной зоне горной выработки и разработан способ охлаждения рудничного воздуха аккумуляторами холода на базе льдосоляной смеси в теплообменных камерах установки, использование которого обеспечивает снижение температуры воздуха в локальной рабочей зоне до нормативных значений (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более 299 К).

Основные научные и практические результаты работы и вытекающие из них выводы состоят в следующем:

1. В результате анализа состояния вопроса установлено, что на рабочих местах в горных выработках температура воздуха составляет 301...308 К, что приводит к тепловому удару горнорабочих, поэтому предложена нормализация температуры воздуха в локальной рабочей зоне применением хладагентов на основе льдосоляной смеси в условиях фазовых переходов льда при взаимодействии с движущейся струей воздуха, которые позволяют охлаждать воздушный поток в локальной рабочей зоне за счет эндотермических реакций гидратации соли в воде.

2. В результате рассмотрения теплообменных процессов при охлаждении воздуха хладагентами установлена экспоненциальная зависимость скорости фазового перехода льдосоляной смеси, а также аналитические зависимости, характеризующие процесс взаимодействия охлажденной воздушной струи со спутным воздушным потоком.

3. Результаты экспериментальных и теоретических исследований позволили обосновать параметры охлаждения воздушного потока для нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне применением хладагентов на основе льдосоляной смеси с массовой долей соли NaCl в смеси равной 0,2.

4. Дано обоснование эффективных параметров аккумуляторов холода на базе решения известных уравнений теплопроводности Фурье, от скоростей охлажденной струи воздуха и спутного воздушного потока, а также их начальных температур.

5. Экспериментальные исследования позволили установить оптимальные соотношения льда и соли NaCl в зависимости от температуры воздуха и начальной температуры льдосоляной смеси.

6. Разработан способ охлаждения рудничного воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки аккумуляторами холода, размещенными в теплообменных камерах установки, прошедшей опытно-промышленные испытания в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР.

7. В результате лабораторных и промышленных испытаний разработано «Техническое задание на установку для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», согласованное с ведущими организациями по безопасности работ в горной промышленности: «МАКНИИ»; НИИГД «РЕСПИРАТОР».

8. Разработаны «Методические рекомендации по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», согласованные с НИИГД «РЕСПИРАТОР».

9. Решение актуальной научно-технической задачи по нормализации температурного режима в локальной зоне горной выработки позволило обеспечить безопасные условия труда горнорабочих при ведении аварийно-восстановительных и ремонтных работ и имеет значимый социальный эффект так как снижает количество смертей шахтеров от воздействия тепловых факторов.

ПЕРЕЧЕНЬ ПРИНЯТЫХ УСЛОВНЫХ СОКРАЩЕНИЙ

УОВ – модель установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.

АХ – аккумулятор холода.

ЛС – льдосоляная смесь.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Мартынов, А.А. Тепловой режим глубоких угольных шахт** [Текст]: монография / А.А.Мартынов, Н.В.Малеев, А.К. Яковенко ; под ред. А.А. Мартынова. - Донецк: изд-во «Ноулидж», 2014.- 443 стр.
2. **Подвигин, К.А., Локальное охлаждение рудничного воздуха льдом** / К.А. Подвигин // Донбасс будущего глазами молодых ученых: сборник материалов научно-технической конференции, г. Донецк, 19 ноября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 130-133.
3. **Подвигин, К.А., Анализ существующих средств и способов нормализации тепловых условий глубоких шахт** / К.А. Подвигин // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 21-23 мая 2019 г. – Донецк: ДОННТУ, 2019. Т. 1: 1. Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве. – 2019. – С. 143-152.
4. **СОУ-Н 10.1.00174088.027:2011. Прогнозування та нормалізація теплових умов у вугільних шахтах** [Текст]. – Макіївка, 2011. – 188 с.
5. **Тишин, Р.А. Обоснование способа и параметров установки охлаждения воздуха в локальных зонах глубоких шахт на основе гидроэжекции** [Текст]: дис...канд. техн. наук: 05.26.01: защищена 29.11.18: утв. 05.12.18 /Тишин Роман Александрович. - Макеевка, 2018.-229 с. -Библиогр.: с. 140-151.
6. **НПАОТ 10.0-1.01-16:2016 Правила безопасности в угольных шахтах** [Электронный ресурс]: утверждено Государственным комитетом горного и технического надзора ДНР и Министерством угля и энергетики ДНР от 18 апреля 2016 г.-217 с.
7. **Студенский, Р. Влияние температуры воздуха на несчастные случаи** / Р. Студенский // Горная промышленность. – 1980. – №12. – С. 606–610.
8. **Андрющенко, В.Н. Климатические условия в глубоких шахтах**/ В.Н. Андрющенко, Ю.Д. Дядькин, Е.П. Захаров // Техника безопасности и горноспасательное дело. – М.:ЦНИЭИуголь, 1974.- С.43

9. **Кремнев, О.А. Тепло- и массообмен в горном массиве и подземных сооружениях** / О.А. Кремнев, В.Я. Журавленко // Научная мысль. – Киев – 1986.- 339 с.
10. **Рой Дж. Доссат Основы холодильной техники** / Рой Дж. Доссат // Легкая пищевая промышленность. – Москва – 1984. – 519 с.
11. **Государственное предприятие научно-исследовательский институт медико-экологических проблем Донбасса и угольной промышленности** [Текст]. Медицинская технология после переменной реабилитации, диспансеризации и 141 лечение работников угольной промышленности (медицинские рекомендации) – Донецк. – 2005. – С. 4–10
12. **Мартынов, А.А. Предельно допустимая температура воздуха и профилактика тепловых поражений в глубоких шахтах** / А.А. Мартынов, А.М. Брюханов, В.В. Мухин // Уголь Украины. - 2004. - №11. - С. 39-42.
13. **Сергеев, В.А. Обоснование направлений совершенствования средств автоматизации процессов горного производства на основе анализа смертельного травматизма** / В.А. Сергеев // Научные труды Донецкого национального технического университета. - 2013. - №2 (26). - С. 229-233.
14. **Информация о травматизме на предприятиях Минэнергоуголь** [электронный ресурс]: Минэнергоугля – Системные требования: Pentium–266; 32 Mb RAM; Windows 98/2000/NT/XP.– Название с титульного экрана.
15. **Государственные санитарные правила и нормы. Предприятия угольной промышленности ЗВТ.:** ДСП 3.3.1.095-2002.: [в МОЗ Украины 13.12.2002.] – К.: – Нормативно-правовой документ Минохранздоровья Украины. – 2003. – 32с.– (Национальный стандарт Украины) (табл. 5).
16. **Индивидуальная противогазотепловая защита:** монография / Ю. Ф. Булгаков [и др.]. - Донецк : Норд Компьютер, 2015. - 385 с.
17. **Яремко, Е. Е. Характеристика мозгового кровообращения у спортсменовединоборцев по данным реоэнцефалографии** / Е. Е. Яремко,

3. С. Федоришин // Теория и практика физической культуры. – 1989. – № 4. – С. 44–47.
18. **Онасенко, А.А. Комплект средств экстренного охлаждения пострадавших при перегревании / А.А.Онасенко, В.А.Вольский, И.Ф.Марийчук // Уголь Украины. - 2005. - № 3. - С. 32-34.**
19. **Онасенко, А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в противогазотепловом костюме с водоледяными охлаждающими элементами / А.А.Онасенко, И.Ф.Марийчук // Форум гірників. -2005.: Матеріали міжнародної конференції, 12 – 14 жовтня 2005. – Т.3. – Днепропетровск: ГНУ, 2005. – С. 206 – 214.**
20. **Онасенко, А.А. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий пакет – человек» / А.А. Онасенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. - НИИГД. - Донецк, 2005. – Вып. 42. - С. 120-125.**
21. **Анализ аварий и горноспасательных работ на шахтах Минуглепрома за 1997–2006 гг. – Донецк ЦШ ГВГСС, 2007.—220 с.**
22. **Онасенко, А.А. Безопасность труда горнорабочих и членов ВГК шахты в экстремальных микроклиматических условиях / Онасенко А.А. Марийчук И.Ф. // Уголь Украины – 2004. – № 8. – С. 47 –49.**
23. **Лыков, А.В. Тепломассообмен. Справочник. – 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1978. - 480 с.**
24. **Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики [Текст]: учебн. для вузов / А.Н.Тихонов, А.А.Самарский. М.: Изд-во МГУ Наука, 2004. -724с.**
25. **Юдицкий, Б.Д. Величины потребления кислорода при основных видах горноспасательных работ как расчетные параметры для конструирования респираторов: Сб. / Б.Д.Юдицкий // Материалы к конструированию и испытанию защитных дыхательных приборов. – М.: Недра. – 1965. -С. 33-42.**

26. **Технический проект противотепловой защиты горнорабочих ДП «Шахта им. Ф.Э. Дзержинского» ГП «Ровенькиантрацит»:** Утв. НИИГД 12.12.2003. – Донецк: НИИГД, 2003. – 49 с.
27. **Вспомогательная горноспасательная служба на предприятиях по добыче угля (ШГС и ВТК).** Положение. Утв. 11.05.1998 г Министром угольной промышленности Украины. – Донецк, 1998. – 23 с.
28. **Брюханов, А.М. Предотвращение аварий в угольных шахтах / А.М. Брюханов, В.П. Каптиков, Н.Б. Левкин // Проблемы пожарной безопасности. Ликвидация аварий и их последствий. Труды Международной науч.-практич. конф. – Донецк, 2002. – С. 34 – 35.**
29. **Нормирование безопасной продолжительности работы горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях / Н.С. Диденко, В.В. Карпекин, А.П. Юрьев, В.И. Костюкова // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. - НИИГД. – Донецк, 1995. - С. 84-89.**
30. **Клименко, Ю.В. Водоледная система охлаждения ступней / Ю.В. Клименко, И.Я. Землянский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. - НИИГД. – Донецк, 2002 . С. 119-125.**
31. **Карпекин, В.В. Определение параметров водоледного аккумулятора холода для противотепловой одежды горноспасателей / В.В. Карпекин, И.Ф. Марийчук, Ю.В. Клименко // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ, 2002. – № 5. - С. 82-86.**
32. **Землянский, И.Я. Установка «Зима-А» для замораживания охлаждающих элементов с помощью газообразного азота / И.Я. Землянский, Н.Я. Полшков // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. - НИИГД. - Донецк, 1989. - С. 53-54.**
33. **Воронов, П.С. Воздушная установка для замораживания охлаждающих элементов к противотепловым средствам горноспасателей / П.С. Воронов, И.Ф. Марийчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. - НИИГД «Респиратор». - Донецк, 2003. - С. 12-13.**

34. **Мычко, А.А. Разработка методов оценки защитных свойств и выбора текстильных материалов для специальных изделий в экстремальных условиях** [Текст]: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Санкт-Петербург – Северодонецк, 1997. – 568 с.
35. **Баранова, И.М. Основы линейного и нелинейного регрессионного и корреляционного анализов** / И.М. Баранова, Н.А. Часова, Г.Д. Алексеева, А.Н. Муравьев // М.: Наука, 1977. - 408 с.
36. **Карпекин, В.В. Изолирующий газозащитный костюм** / В.В. Карпекин, А.П. Рыбалко, В.И. Костюкова // Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. - НИИГД. - Донецк, 1993. - С. 49-54.
37. **Клименко, Ю.В. Теоретические основы тепловых расчетов противотепловой одежды для горноспасателей** / Ю.В. Клименко // Науковий вісник ГНА України. – Дніпропетровськ, 2001. – № 3. – С. 70 – 73.
38. **Программа нормализации тепловых условий глубоких шахт Донбасса на 1989 – 1995 годы** / Минуглепром СССР: Утв. 08.04.89. – М.: 1989. – 40 с.
39. **Руководство по ведению горноспасательных работ в условиях высоких температур рудничной атмосферы** / [Судиловский И.Н., Гладков Ю.А., Белик И.П., Привалов Н.И. и др.] //: Утв. ВУ ВГСЧ 14. 12. 87. - ВНИИГД. – Донецк, 1987. – 36 с.
40. **Исследование противотепловых курток ТК-50** / [Петулько В.А., Землянский И.Я., Новикова Р.М., Романчук Ф.А.] // Горноспасательная техника и противоаварийная защита шахт: Сб. науч. трудов. - ВНИИГД. – Донецк, 1986. - С. 19-24.
41. **Гамбицкий, Е.В. Тепловые поражения** / Е.В. Гамбицкий, Г.Н. Новожилов, С.Д. Положенцев // Клиническая медицина. – 1989. – т. 67. – № 5. – С. 10-17.
42. **Исследование возможности экстренного выведения человека из состояния гипертермии путем локального охлаждения** / [Городницкий С.М., Бавро Г.В., Игнатъев О.Б., Колыханова И.Н. и др.] // Медико-

технические проблемы индивидуальной защиты человека: Сб. науч. трудов // Ин-т. биофизики МЗ СССР. – М., 1973. – Вып.13. – С. 12-22.

43. **Негрей, В.Ф. Влияние умеренного охлаждения надгрудинной и межлопаточной областей поверхности тела на тепловую устойчивость организма человека / В.Ф. Негрей // Медико-технические проблемы индивидуальной защиты человека: сб. науч. трудов / Ин-т биофизики МЗ СССР. – М., 1985. – Вып. 6. – С. 38-45.**
44. **Исследование возможности создания средств экстренного охлаждения пострадавшего от перегрева и методов их применения [Текст]: Отчет о НИР (заключительный) / ВНИИГД: Руководитель В.А. Петулько. – № ГРО1870059163. – Донецк, 1989. – 188 с.**
45. **Онасенко, А.А. Комплексный показатель шахтного микроклимата – Термоиндекс / А.А. Онасенко, Ю.В. Клименко, В.В. Карпекин // 10-я Пленарная сессия международного бюро по Горной теплофизике «18 МТ2005» – Гливице (Польша): Силезский Политехнический институт, 2005. – С. 455-459.**
46. **Физиолого-гигиенические требования к изолирующим средствам индивидуальной защиты: Утв. Минздравом СССР 23.06.80 / М.: 1981. – 28 с.**
47. **Клименко, Ю.В. Воздействие лучистого потока на человека при тушении подземного пожара / Клименко Ю.В. Марийчук И.Ф. // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ, 2002. – № 1. – С. 46 – 49.**
48. **Теплотехника [Текст]: Учебник для ВУЗов / А.П. Баскаков, О.К. Витт и др.; под ред. А.П. Баскакова. – М.: Энергоиздат. 1982. – 264 с.**
49. **Онасенко, А.А. Теоретические основы тепломассопереноса в газозащитном костюме с водолепяной системой охлаждения / А.А. Онасенко // Проблемы экологии: сб. науч тр. ДонНТУ. – Донецк. 2005. -№ 6. - С. 67-77.**
50. **Пашковский, П.С. Процессы тепломассопереноса в противогазотепловом костюме / П.С. Пашковский, А.А. Онасенко //**

Тезисы III Международной научно-практической конф. «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация», 2005. – Минск. – 2005, Т3. - С. 215-216.

51. **Онасенко, А.А. Математическое моделирование теплообменных процессов в противогазотепловом костюме с водоледяными охлаждающими элементами / А.А. Онасенко, И.Ф. Марийчук // Форум гірників 2005: Матеріали міжнародної конференції, 12 – 14 жовтня 2005. – Т.3. – Днепропетровск: ГНУ, 2005. - С. 206-214.**
52. **Онасенко, А.А. Теплообменные процессы в системе «окружающая среда – охлаждающий жилет – человек»/ Горноспасательное дело: Сб. науч. тр. - НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2005. – Вып.42. - С. 120-125.**
53. **Нормирование безопасной продолжительности работы горноспасателей в экстремальных микроклиматических условиях / [Диденко Н.С., Карпекин В.В., Юрьев А.П., Костюкова В.И.] // Горноспасательное дело / НИИГД. – Донецк, 1995. - С. 84-89.**
54. **Юдицкий, Б.Д. Величины потребления кислорода при основных видах горноспасательных работ как расчетные параметры для конструирования респираторов / Б.Д. Юдицкий // Материалы к конструированию и испытанию защитных дыхательных приборов. – М.: Недра. – 1965. - С. 33-42.**
55. **Онасенко, А.А. Энергозатраты человека в экстремальных микроклиматических условиях / А.А. Онасенко, В.А. Вольский, В.В. Карпекин // Уголь Украины. – 2005. – № 9. - С. 38-39.**
56. **Юдицкий, Б.Д. Величины потребления кислорода при основных видах горноспасательных работ как расчетные параметры для конструирования респираторов / Б.Д. Юдицкий // Материалы к конструированию и испытанию защитных дыхательных приборов. – М.: Недра. – 1965. – С. 33**
57. **Карпекин, В.В. Защитная способность изолирующих регенеративных дыхательных аппаратов / В.В. Карпекин, Н.С. Диденко // Тактические**

приемы ведения горноспасательных работ и техническое оснащение ВГСЧ.: Сб. науч. тр. - ВНИИГД. – Донецк, 1982. - С. 115-120.

58. **Кабанов, А.И. Экономические методы формирования и реализации государственной научно-технической политики в угольной промышленности** / А.И. Кабанов. – Донецк: ИЭП НАН Украины, 1998, - 447 с.
59. **Солодовник, Л.М. Экономика производственного предприятия** [Текст]: учебное пособие / Л.М. Солодовник, П.И. Пономаренко // – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2004. – 285 с.
60. **Матякова, Е.В. Охрана труда и экономика предприятия.** – Донецк, 2000. – 227 с.
61. **Безсонов, Н.В. Пособие для расчетов экономического эффекта от использования изобретений и рационализаторских предложений** / Под ред. Т.П. Иванова – Москва, 1983. – 95 с.
62. **Воронов, П.С. Обоснование параметров и создание комплекса протитепловой защиты горноспасателей с использованием сжатого воздуха** [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.26.01 / Воронов Павел Сергеевич. Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности. - Макеевка, 2009. - 20 с.
63. **Тишин, Р.А. Обоснование параметров гидродинамического охлаждения рудничного воздуха при его орошении** / [Р.А. Тишин, И.А. Толкунов, В.А. Сыроватченко, В.Б. Гого] // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: «Горно-электромеханическая» / ДонНТУ. –Донецк, 2013. – Вып. № 2(26)'2013. – С. 258-265.

Приложение А

Копия технических требований к установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



УТВЕРЖДАЮ
проректор по научной работе
ГОУВПО «ДОННТУ»

С.В. Борщевский

«14» сентября 2020 г.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ
к установке для охлаждения воздуха
в локальной рабочей зоне горной выработки

РАЗРАБОТАНО
кафедрой «Охраны труда и
аэрология» ГОУВПО «ДОННТУ»

Ю.Ф. Булгаков

«12» сентября 2020 г.

Ответственный исполнитель:
аспирант кафедры «Охрана труда
и аэрология» ГОУВПО «ДОННТУ»

К.А. Подвигин

«12» сентября 2020 г.

Донецк-2020 г.



СОГЛАСНО ОРГАНИЗАЦИИ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. Назначение и область применения	3
2. Техническое обоснование разработки установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	3
3. Место размещения установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки и параметры окружающей среды.....	3
4. Требования к массогабаритным характеристикам установки.....	4
5. Требования к конструкции установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки и ее производительности.....	4
6. Состав установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.....	5
7. Принцип работы установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.....	8
8. Требования к отдельным составным частям установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	9
9. Требования к безопасности при эксплуатации установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.....	10
10. Нормативные документы, которым должна отвечать установка для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.....	12
Приложения А – Варианты расположения установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки	13
Приложение Б – Эскизный проект установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.....	14
Приложения В – Схема аккумулятора холода	17

1. Назначение и область применения

1.1 Настоящие исходные технические требования (ИТТ) определяют требования к разработке, оснащению, изготовлению и контролю качества изготовления установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки (далее по тексту установка).

1.2 Установка служит для снижения температуры воздуха в локальной рабочей зоне горных выработках.

2. Техническое обоснование разработки установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

2.1 Требования к обоснованию разработки установки определяются необходимостью создания нормативных микроклиматических условий труда в рабочей зоне горной выработки (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16) и конкурентоспособностью по техническим, экономическим и эксплуатационным показателям.

3. Место размещения установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки и параметры окружающей среды

Установка может располагаться:

- 1) в уширении горных выработок (на почве или в подвешенном состоянии Приложение А);
- 2) на рельсовом пути (на платформе использующихся в шахте вагонеток).

Охлаждаемый воздух должен удовлетворять требованиям таблицы 3.1.

Таблица 3.1.

Основные требования к охлаждаемому воздуху

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура, К	от 299,15 до 308,15
2	Относительная влажность, %	до 100
3	Запыленность, мг/м ³	до 100
4	Барометрическое давление, МПа	от 0,097 до 0,12
5	Скорость движения воздуха в локальной зоне горной выработки, м/с	не менее 0,2

4. Требования к массогабаритным характеристикам установки

4.1. Габаритные размеры элементов установки должны обеспечивать ее мобильное перемещение по подземным горным выработкам сечением не менее $S_{CB} = 9 \text{ м}^2$ (в том числе по участковым) быстрый монтаж и демонтаж (Приложение Б).

4.2. Масса установки без аккумуляторов холода, приспособлений для перемещения и вентилятора местного проветривания (далее по тексту ВМП) не должна превышать 150 кг, а отдельные составные части не более 25 кг.

5. Требования к конструкции установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки и ее производительности

5.1. Разработка и изготовление установки должны базироваться на апробированной технологии изготовления, опыте эксплуатации подобного оборудования в горной промышленности.

5.2. Применяемые в конструкции установки материалы не должны быть опасными и вредными для обслуживающего персонала. Недопустимо применение материалов, не прошедших гигиеническую проверку и проверку на пожароопасность в установленном порядке.

5.3. Конструкция установки должна соответствовать современным требованиям технической эстетики, а при обслуживании современным требованиям эргономики.

5.4. Конструкция установки должна обеспечивать:

- возможность разборки на составные части весом не более 25 кг;
- возможность дренажа жидкости с внутреннего пространства установки;
- возможность осмотра поверхностей, удобство осуществления технического обслуживания и проверок в процессе эксплуатации.

Установка должна обеспечить нормализацию микроклиматических условий по тепловому фактору при ее применении:

1) в условиях локальных рабочих зон в горных выработках протяженность до 4,5 м;

2) в технологических зонах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов (более 100 кВт), создающих значительные техногенные тепловые потоки;

3) при устранении последствий аварии или инцидента (стыковка конвейерной ленты и т.д.);

4) при выполнении горноспасательных работ (проведению специальных поисковых выработок и т.д.).

Технические характеристики установки должны удовлетворять требованиям, приведенным в таблице 5.1.

Таблица 5.1.

Основные технические требования к установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура воздуха на выходе из установки (10...150 мин.), °С при температуре рудничного воздуха на входе 32 – 33 °С, расходе воздуха через установку 0,5 м ³ /с, начальной температуре аккумуляторов холода минус 18 °С	17...20
2	Скорость движения воздуха на выходе из установки, м/с, не более	4
3	Время подготовки установки к работе, мин., не более	15
4	Масса, не более (без вентилятора), кг, не более	150
5	Габаритные размеры в сборе (без вентилятора), м: ширина/длина/высота, не более	1,1/2,0/1,3

6. Состав установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Установка (рисунок 6.1) содержит корпус 1, выполненный из некорродирующей листовой стали, например из оцинкованной листовой стали с теплоизолирующим слоем 2 из пенополистирола. В противоположные торцевые стенки 3 и 4 вмонтированы входной и выходной люки 5 и 6 соответственно для прохода воздуха с откидными крышками 7, две другие противоположные боковые стенки выполнены съемными.

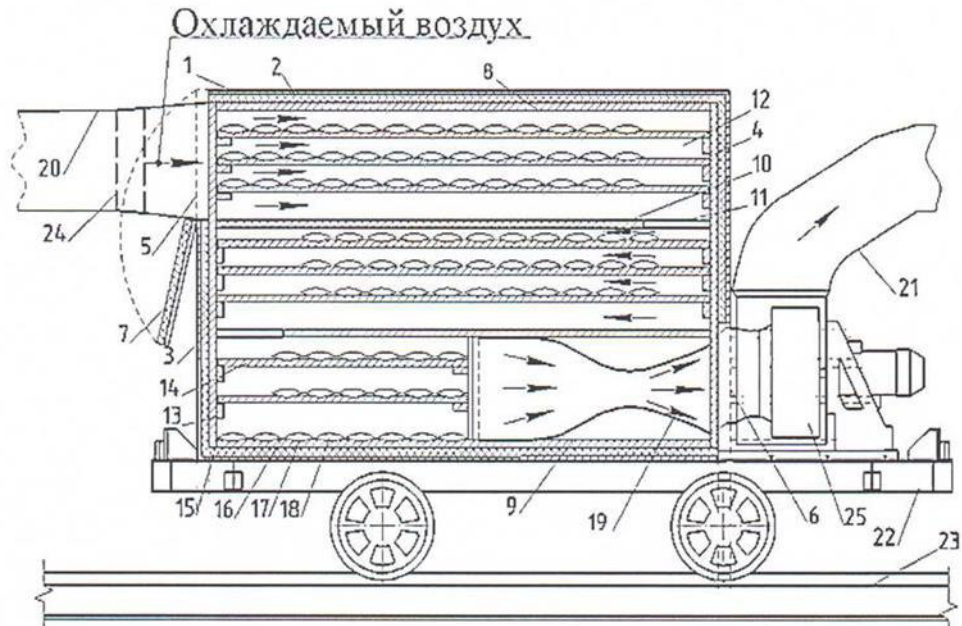


Рисунок 6.1 – Схема экспериментального образца установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Внутренний объем корпуса 1 разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам 8, 9 воздухонепроницаемыми перегородками 10 с проемами 11 на нечетное число теплообменных камер 12. При этом верхняя теплообменная камера взаимосвязана с входным люком 5, а нижняя камера с выходным люком 6. С внутренней стороны противоположных боковых стенок 3 и 4 расположены направляющие 13, на которых размещены выдвижные решетчатые полки 14..

На каждой полке 14 размещены аккумуляторы холода 15, выполненные из полиэтилена толщиной 150 мкм. Аккумуляторы холода (Приложение Б) выполнены с поперечными пережимами 16 вдоль своей продольной оси, образующими ячейки 17 в виде вытянутого эллипсоида вращения. В ячейках 17 размещена льдосоляная смесь 18 с концентрацией $\text{NaCl} - 23\%$. Капсулы аккумулятора холода 15 расположены на полках 14 теплообменных камер 12 по длине полки 14 в один слой и в несколько рядов по ее ширине корпуса 1. В нижней теплообменной камере со стороны выходного люка 6 установлено взаимосвязанное с ним сопло 19.

Для подачи охлаждаемого воздуха во внутренний объем устройства предусмотрено размещение у передней боковой стенки корпуса вентилятора местного проветривания для взаимосвязи с устройством посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20, подсоединяемого к входному люку 3. Для направления охлажденного воздуха в локальную рабочую зону подземной горной выработки предусмотрен подсоединяемый к выходному люку воздушный трубопровод 21. Установка смонтирована на платформе 22 шахтной вагонетки для транспортирования по железнодорожным путям 23 с помощью электровоза, лебедки или вручную.

Назначение функциональных модулей установки приведен в таблице 6.1.

Таблица 6.1.

Назначение функциональных модулей установки

Наименование модуля	Количество единиц	Назначение модуля
корпус теплоизолированный	1	изоляция внутреннего объема установки от притоков тепла извне и утечек холода наружу
перфорированная полка	8	размещение аккумуляторов холода в теплообменных камерах теплоизолированного корпуса
воздухонепроницаемая перегородка	2	разделение внутреннего объема установки на теплообменные камеры и исключение утечек между ними
проем в воздухонепроницаемой перегородке	2	сообщение теплоизолированных камер для перетекания охлаждаемого воздуха
аккумулятор холода	500	охлаждение воздуха (источник холода)
вентилятор местного проветривания	1	продувка воздуха через установку
шибер	1	регулирование скорости продуваемого воздуха через камеры УОВ
гибкий вентиляционный трубопровод	2	соединение вентилятора местного проветривания с теплоизолированным корпусом установки, а так же направление исходящего из установки воздуха в рабочую зону
быстроразъемное соединение (накидной замок для мягких труб)	1	крепление гибкого трубопровода на корпусе вентилятора местного проветривания
люк	2	герметизация внутреннего пространства установки вне рабочее время

7. Принцип работы установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Конструкция установки должна быть блочной. Конструкция блоков должна предусматривать как автономное применение, так и объединение в батареи.

Для подготовки установки к работе вручную открываются крышки 7 люков 5 и 6 (рисунок 6.1), вмонтированных в боковые стенки 3, 4 корпуса 1 с теплоизолирующим слоем 2. Посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20 вентилятор местного проветривания соединяется с входным люком установки 3 при этом регулирование объема воздуха попадающего в теплообменные камеры осуществляется шибером 24. В случае когда в горной выработке отсутствует стационарная подача воздуха (ВМП которые проветривает забой тупиковой выработки и т.д.) для продувания используется ВМП 25 поставляемый вместе с установкой. Поток охлаждаемого воздуха по трубопроводу 20 подается через входной люк 3 в верхнюю теплообменную камеру 12, где разделяется на отдельные потоки, которые перемещаясь вдоль верхней стенки 8 и расположенных на направляющих 13 перфорированных полок 14, контактируют с поверхностью ячеек аккумуляторов холода 15, размещенных на полках 14. Выполнение полок 14 перфорированными (решетчатыми) обеспечивает наиболее полный контакт воздуха с ячейками 15.

Двигаясь вдоль ячеек аккумуляторов холода в виде вытянутого эллипсоида вращения и проходя места пережимов 16, воздушный поток обтекает их, в результате чего возникает его завихрение и поток приобретает турбулентность. По мере продвижения турбулентного потока воздуха по теплообменной камере и его контакта с поверхностью ячеек аккумуляторов холода происходит постепенное охлаждение воздуха. Турбулентное движение потока воздуха наряду со значительной площадью поверхности теплообмена и низкой температурой размещенного в ячейках 15 льдосоляной смеси 18 обеспечивают улучшение конвективного теплообмена,

интенсифицируя процесс охлаждения. Размещение в ячейках льдосоляной смеси обеспечивает снижение его температуры плавления за счет того, что кроме процесса плавления также протекает процесс растворения соли в воде, сопровождаемый понижением температуры плавления льдосоляной смеси. Кроме снижения температуры плавления льдосоляной смеси также происходит увеличение длительности этого процесса, что приводит к увеличению длительности рабочего цикла установки и снижению температуры воздуха подаваемого в локальную рабочую зону.

Воздух из верхней теплообменной камеры 12 через проемы 11 воздухонепроницаемых перегородок 10 последовательно перетекает в нижележащие камеры и подвергается дальнейшему охлаждению. Попадая в нижнюю камеру и контактируя в процессе перемещения с аккумуляторов холода, размещенными на полках и поверхности нижней стенки 9, воздух направляется в выходное сопло 19, где происходит его дополнительное охлаждение за счет снижения абсолютной температуры и давления со значительным увеличением его скорости. Перемещаясь далее через воздушный трубопровод 21, с высокой скоростью интенсивно охлажденный поток воздуха поступает в горную выработку. При истечении охлажденного потока воздуха из воздушного трубопровода 21 с большой скоростью, он попадает в спутный поток нагретого воздуха горной выработки и постепенно смешивается с ним, охлаждая локальную рабочую зону необходимого объема.

8. Требования к отдельным составным частям установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Теплоизолированный корпус установки должен удовлетворять следующим требованиям:

- исключать утечки воздуха между отсеками и за его пределы;
- размещать в теплообменных камерах 500 шт. аккумуляторов холода;

- предусматривать сообщение отсеков проемами для прохода воздуха, площадь которых, должна быть одинакова;
- на входе в установку конструкцией должно быть предусмотрено устройство для регулировки скорости подачи воздуха;

Выдвижные полки должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечить ориентацию потока воздуха с аккумуляторами холода;
- выдерживать нагрузку, создаваемую весом аккумуляторов холода;

Гибкий вентиляционный трубопровод необходим для соединения установки с вентилятором местного проветривания, а так же для направления (подачи и транспортировки) охлажденного воздуха непосредственно на рабочее место. В зависимости от типа вентилятора местного проветривания (далее ВМП) следует применять трубопровод диаметром 0,6 или 0,8 м. Вентиляционный трубопровод должен соединяться с ВМП с помощью быстроразъемного соединения (накидного замка для мягких труб).

ВМП может применяться как с электрическим, так и с пневматическим двигателем, должен иметь номинальную подачу от 1,5 до 4,5 м³/с. ВМП при эксплуатации может размещаться в подвешенном состоянии (подвешивается к крепи горной выработки) или на шахтной платформе типа «П-2,5-02» и иметь для этого приспособления.

9. Требования к безопасности при эксплуатации установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

1. Взрывобезопасные вентиляторы с электрическим и электропневматическим приводом должны иметь взрывозащищенные электродвигатели с уровнем взрывозащиты РВ по ГОСТ 12.2.020. В вентиляторах со встроенным электродвигателем, после установки электродвигателя в корпус вентилятора, параметры взрывозащиты (ширина и длина щели взрывопроницаемых соединений, пути утечки и электрические зазоры) должны соответствовать требованиям технических условий на электродвигатель.

2. Корпус вентилятора и лопадки рабочих колес взрывобезопасных вентиляторов должны изготавливаться из материалов, образующих пару, не опасную в отношении воспламенения от фрикционных искр смеси метана с воздухом.

3. Лопатки рабочего колеса и направляющего аппарата и другие детали из полимерных материалов вентиляторов взрывобезопасного исполнения должны изготавливаться из материалов, безопасных в отношении электростатических зарядов (т.е. с удельным поверхностным электрическим сопротивлением или электрическим сопротивлением изоляции не более 10¹¹ Ом) или должны быть армированы металлическим проводником таким образом, чтобы расстояние от наиболее удаленной точки на диэлектрике до заземленного проводника не превышало 50 мм.

4. Степень защиты электродвигателей вентиляторов должна быть не ниже IP 54 по ГОСТ 17494.

5. Корпус вентилятора должен иметь зажимы для присоединения к цепи заземления (основной и резервный), а вводное устройство должно иметь внутренний заземляющий зажим для присоединения заземляющей жилы питающего кабеля. Зажимы должны быть выполнены по ГОСТ 21130.

6. Электробезопасность вентиляторов должна соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.007.0 и ГОСТ 12.1.038 . Класс по способу защиты человека от поражения электрическим током I .

7. Сопротивление изоляции обмотки статора электродвигателя после его установки на вентилятор должно быть не менее 10 МОм. (Измененная редакция, Изм. № 1).

8. Крепления вращающихся частей вентилятора должны быть предохранены от самопроизвольного рассоединения и ослабления.

9. На всасывающем отверстии вентилятора должна быть установлена защитная решетка со степенью защиты не менее IP 10 по ГОСТ 17494.

10. Уровни звуковой мощности вентилятора в октавных полосах частот не должны превышать значений, указанных в табл. 6 . Уровни

звукового давления на расстоянии 10 м от всасывающего отверстия вдоль оси вентилятора, при его работе в режиме максимального КПД, должны соответствовать требованиям ГОСТ 12.1.003 для постоянных рабочих мест в производственных помещениях и на территории предприятий.

11. Для работы на установке должны допускаться люди, прошедшие обучение и успешно сдавшие экзамен.

12. Перед включением в работу установки персонал должен ее осматривать на отсутствие поломок.

13. Гигиенические требования к установке должны соответствовать ДНАОП 0.03-8.01-73.

10. Нормативные документы, которым должна отвечать установка для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

Правила безопасности в угольных шахтах. Государственный Комитет горного и технического надзора ДНР и Министерства угля и энергетики ДНР от 18 апреля 2016 г. №36/208.

ДСТУ 2708-99 Метрология. Поверка приборов измерительной техники. Организация и порядок проведения.

ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.

ГОСТ 12.2.049-80. ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргометрические требования.

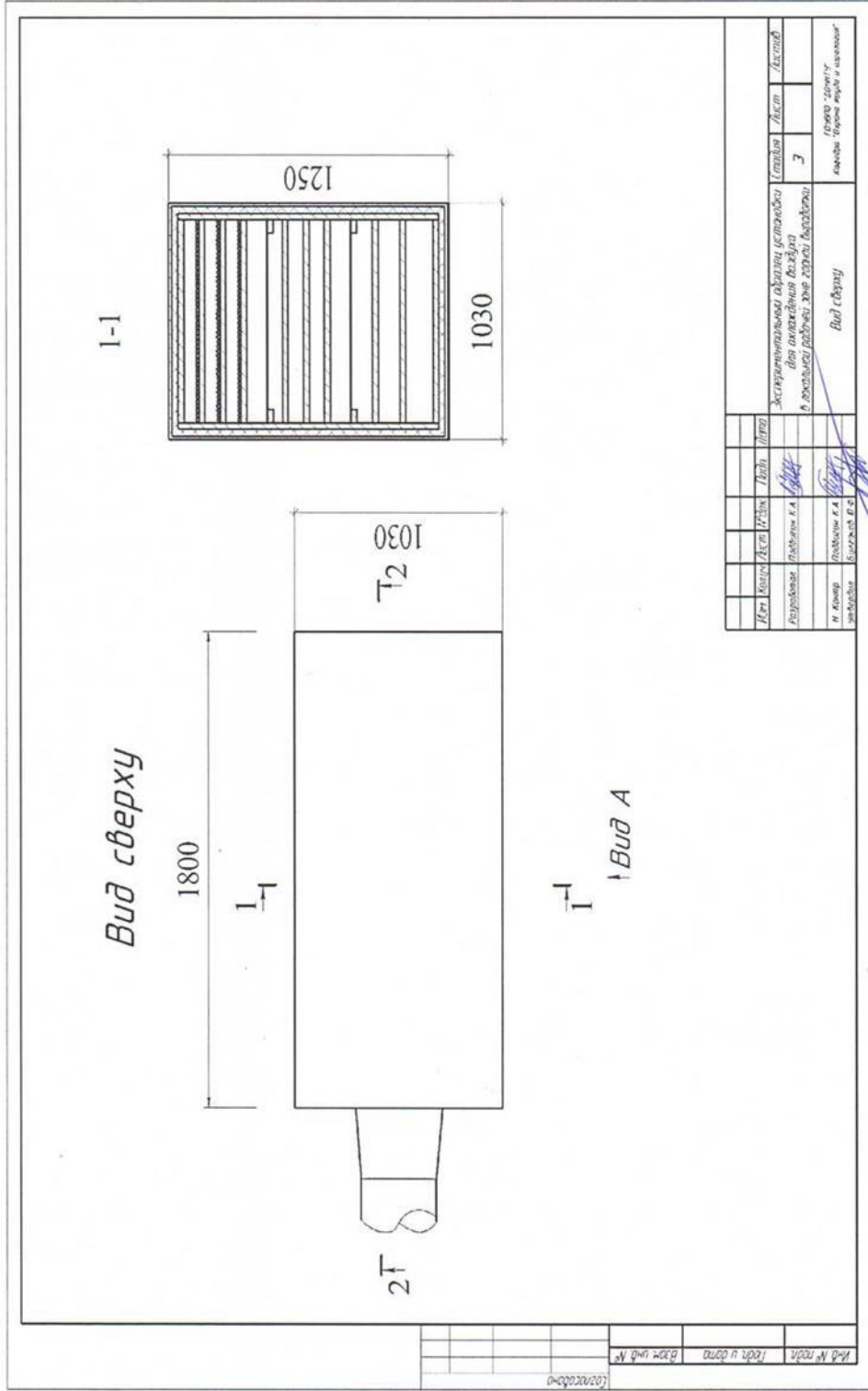
ДНАОП 0.03-8.01-73. Гигиенические требования к горным машинам и механизмам для угольных шахт.

ДСП 3.3.1.095-02. Государственные санитарные правила и нормы (предприятия горной промышленности).

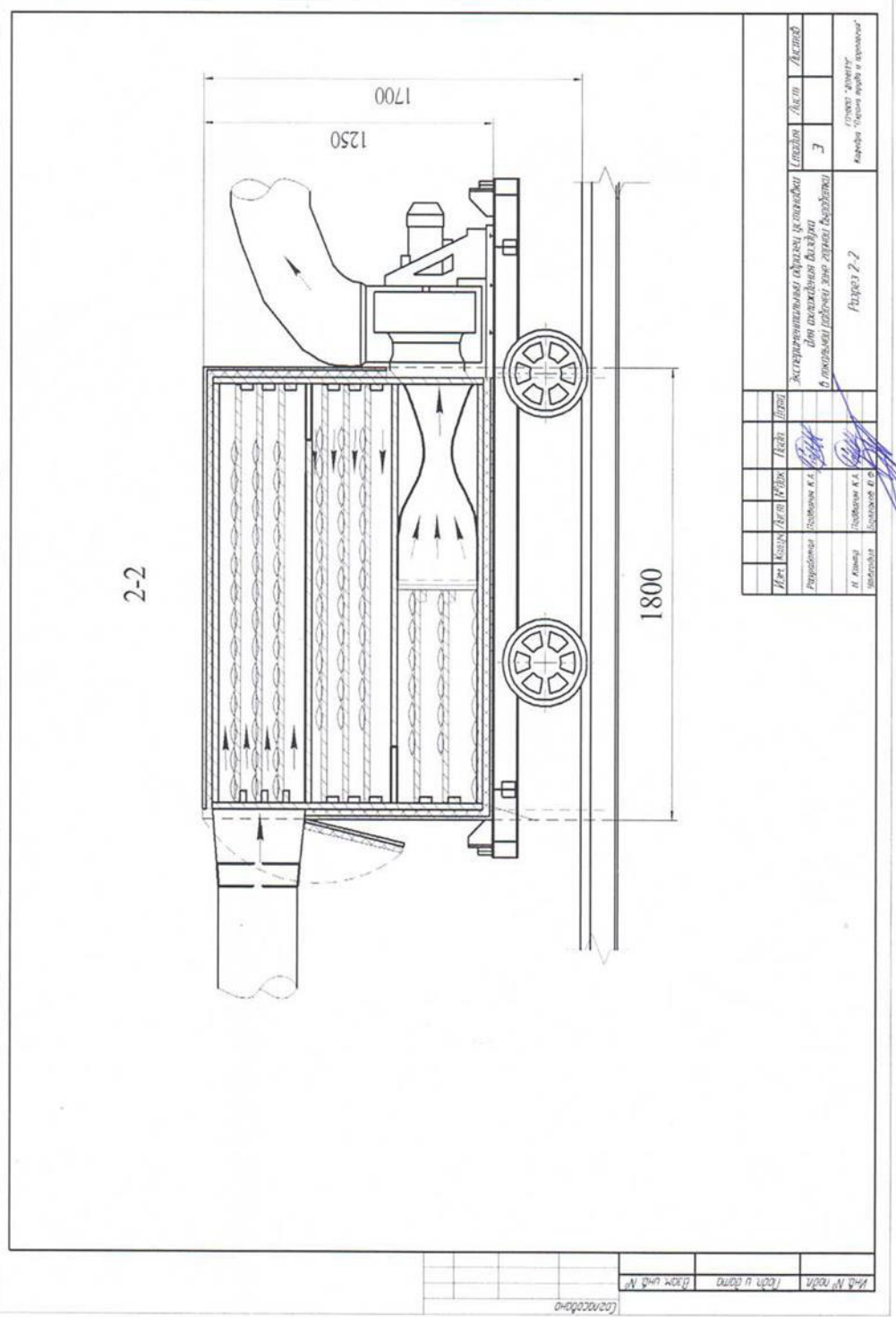
СНиП 2.04.05-90. Отопление, вентиляция и кондиционирование.

СНиП 3.05.05-84. Технологическое оборудование и технологические трубопроводы.

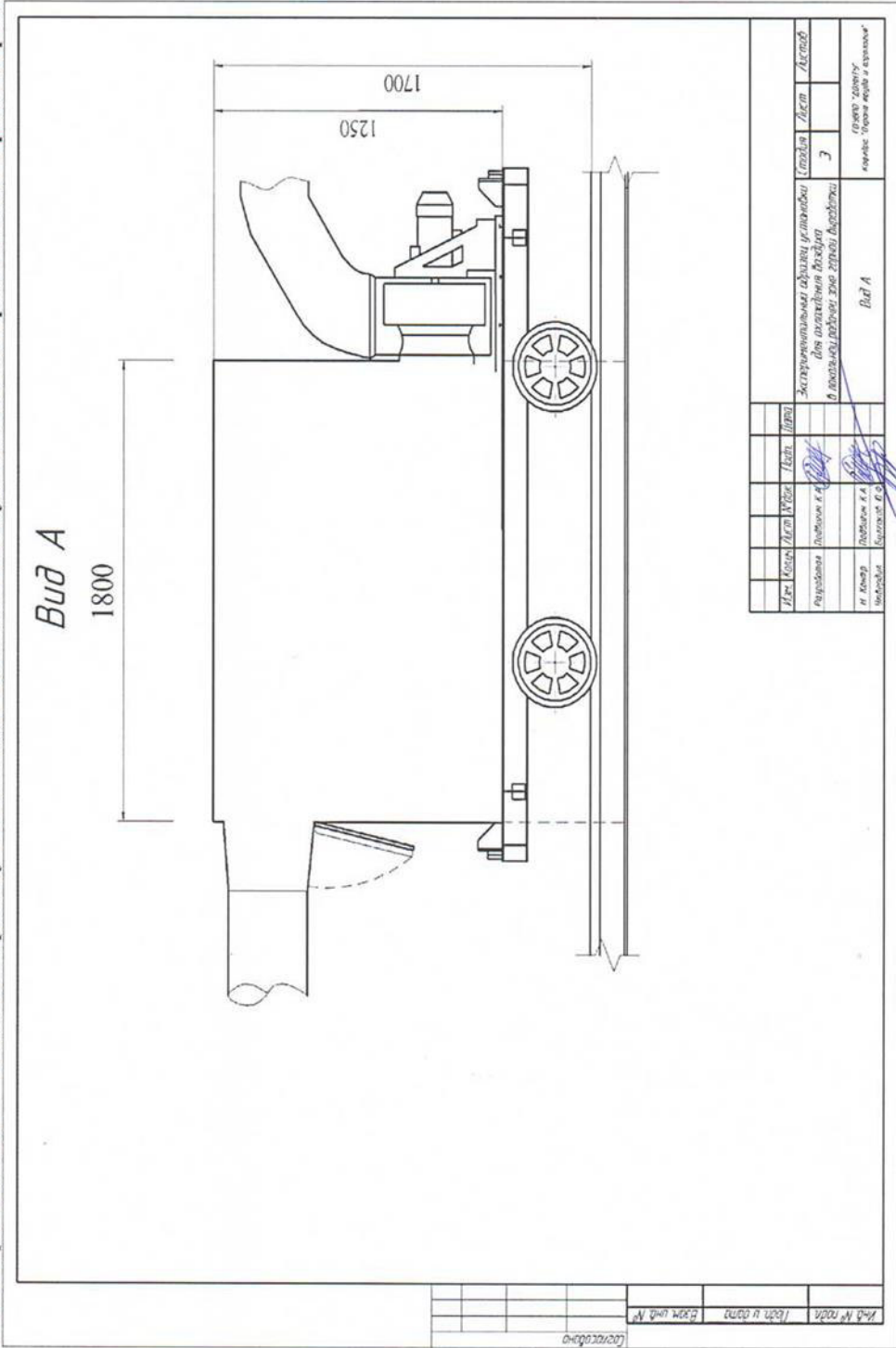
Приложение Б – Эскизный проект установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки



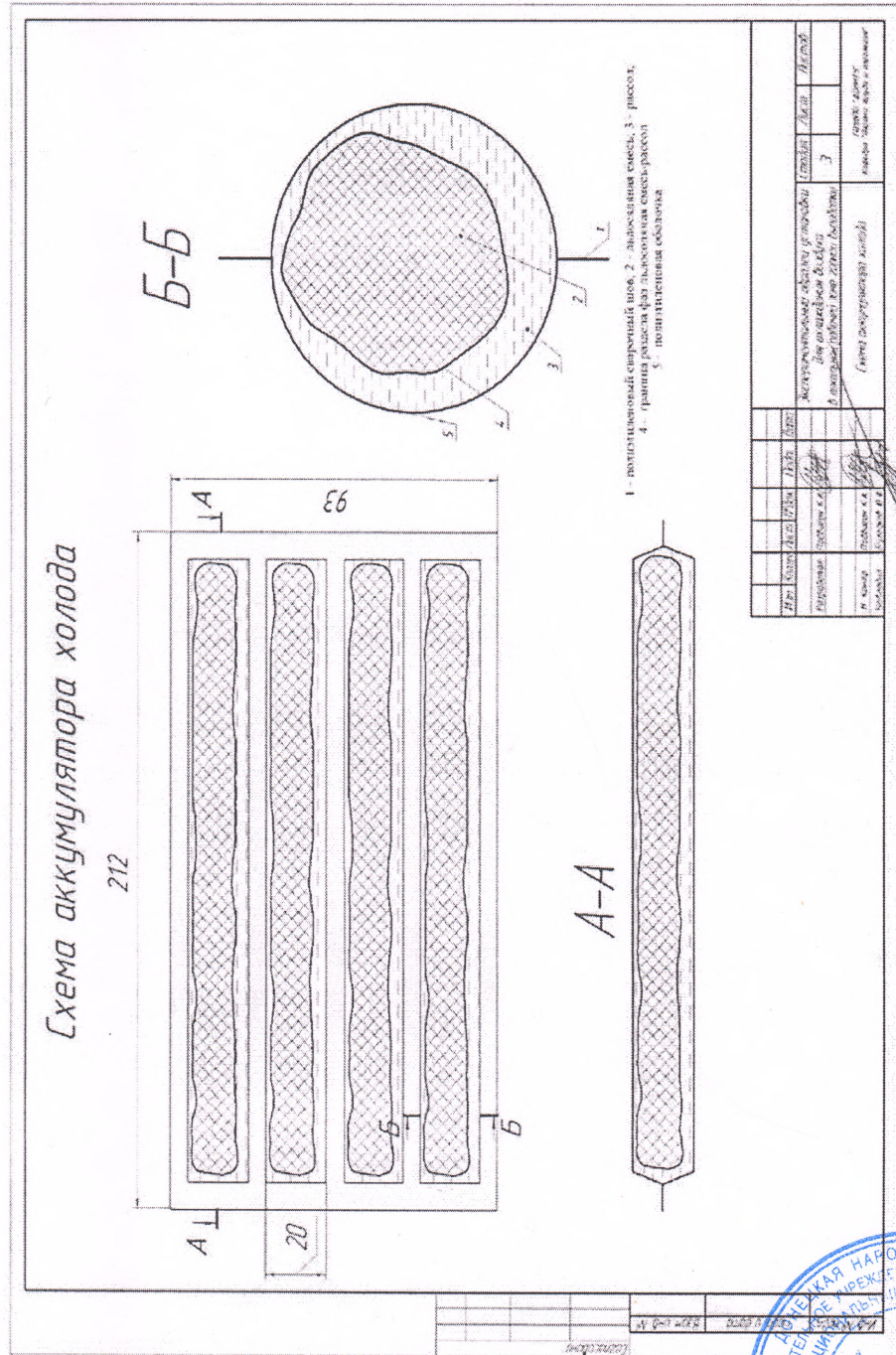
Продолжение приложения Б – Экспертный проект установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки



Окончание приложения Б – Эскизный проект установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки



Приложение В – Схема аккумулятора холода



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
 Ученый секретарь
 диссертационного совета Д 01.008.01
 И.А. Бершадский

Приложение Б

Копия акта опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок

УТВЕРЖДАЮ:

Начальник оперативного отдела
 Департамента Государственной
 военизированной горноспасательной
 службы МЧС ДНР

И.А. Трумилов

2020 г.



АКТ

**опытно-промышленных испытаний установки
 для охлаждения рудничного воздуха в локальных зонах горных
 выработок на основе применения водо-ледяных элементов**

Комиссия в составе:

Булгаков Ю.Ф. – председатель, д.т.н., проф., директор Института горного дела и геологии ДОННТУ.

Спичка В.А. – заместитель председателя, начальник технического отдела Департамента ГВГСС МЧС ДНР.

Курбацкий Е.В. – к.т.н., доцент кафедры «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ.

Подвигин К.А. – аспирант кафедры «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ.

Комиссия установила:

1. Экспериментальная установка для охлаждения воздуха разработана и изготовлена на кафедре «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ по программе диссертационных исследований аспиранта ДОННТУ Подвигина К.А. на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 - «Охрана труда (по отраслям)».
2. Опытно-промышленные испытания экспериментальной установки для охлаждения рудничного воздуха в локальных зонах горной выработки

СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
 Ученый секретарь
 диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский



проведены в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР.

3. В процессе испытаний установки для охлаждения воздуха в локальных зонах горных выработок регистрировались физические параметры воздуха на входе в установку и в охлаждаемой зоне: атмосферное давление, скорость движения, температура и влажность.
4. Результаты испытаний и схемы расположения оборудования представлены в приложениях к Акту.

Выводы комиссии по результатам испытаний:

1. Результаты опытно-промышленных испытаний показали эффективность применения установки для охлаждения рудничного воздуха в локальной зоне горной выработки. Применение установки позволяет снизить температуру воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки до нормативных значений.
2. Результаты опытно-промышленных испытаний соответствуют установленным «Техническим требованиям к установке для локального охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки», разработанным на кафедре «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ.

Рекомендации комиссии по результатам испытаний:

1. Для повышения мобильности установки для локального охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки, рекомендуется разработать ее конструкцию с возможностью разъединения на отдельные составные части массой не более 25 килограмм.
2. Рекомендуется разработать «Техническое задание на установку локального охлаждения воздуха в рабочей зоне горной выработки» и согласовать его с ведущими организациями по безопасности работ в горной промышленности ДНР: МАКНИИ и НИИГД «РЕСПИРАТОР».

Приложения:

- 1 – схема расположения горных выработок учебной шахты оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР;

- 2 – схема расположения экспериментальной установки в наклонном стволе учебной шахты оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР;
- 3 – параметры рудничного воздуха в измерительных сечениях горной выработки в зависимости от времени работы установки.

Председатель комиссии



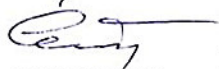
Ю.Ф. Булгаков

Зам. председателя комиссии



В.И. Спичка

Члены комиссии:



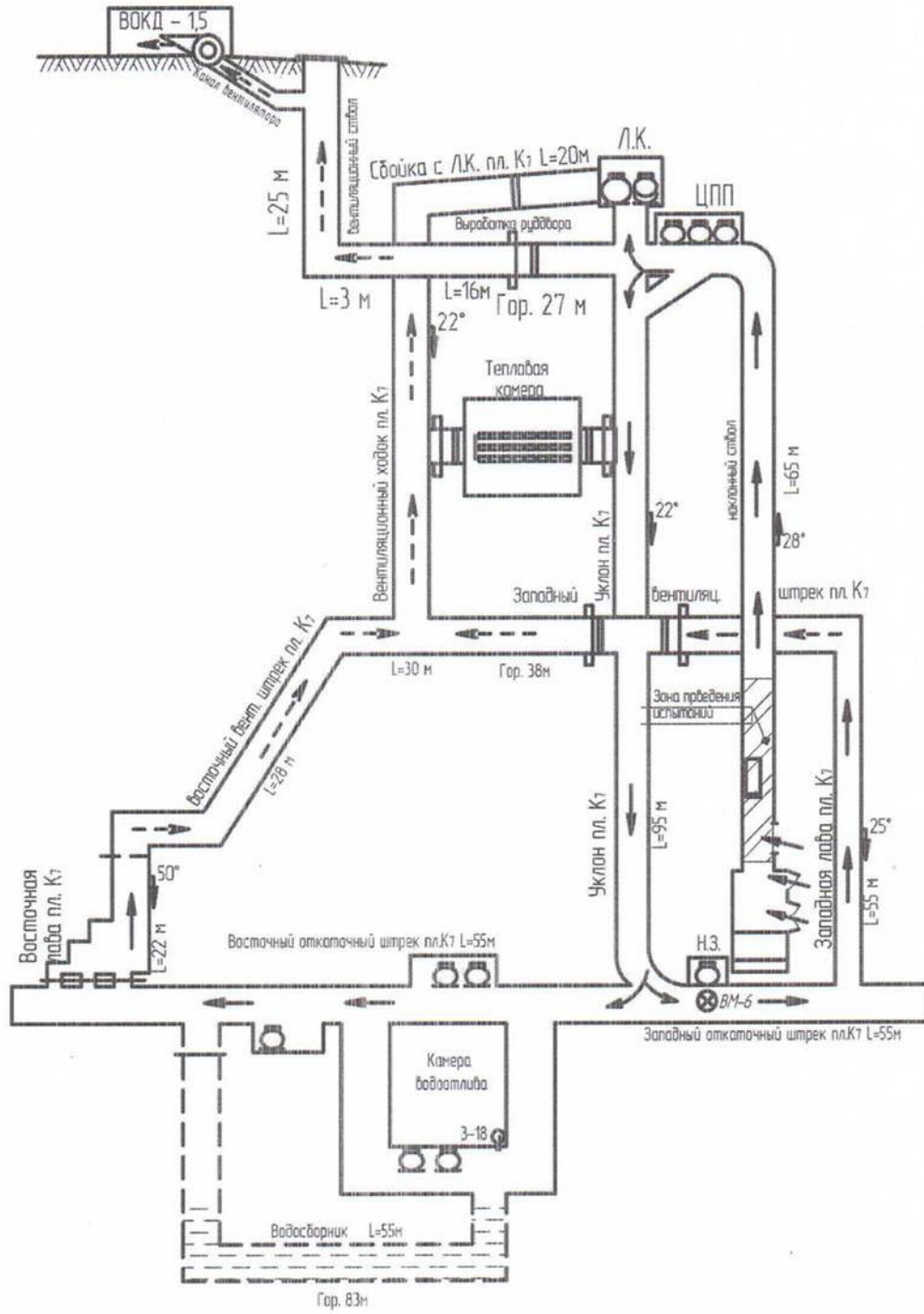
Е.В. Курбацкий



К.А. Подвигин

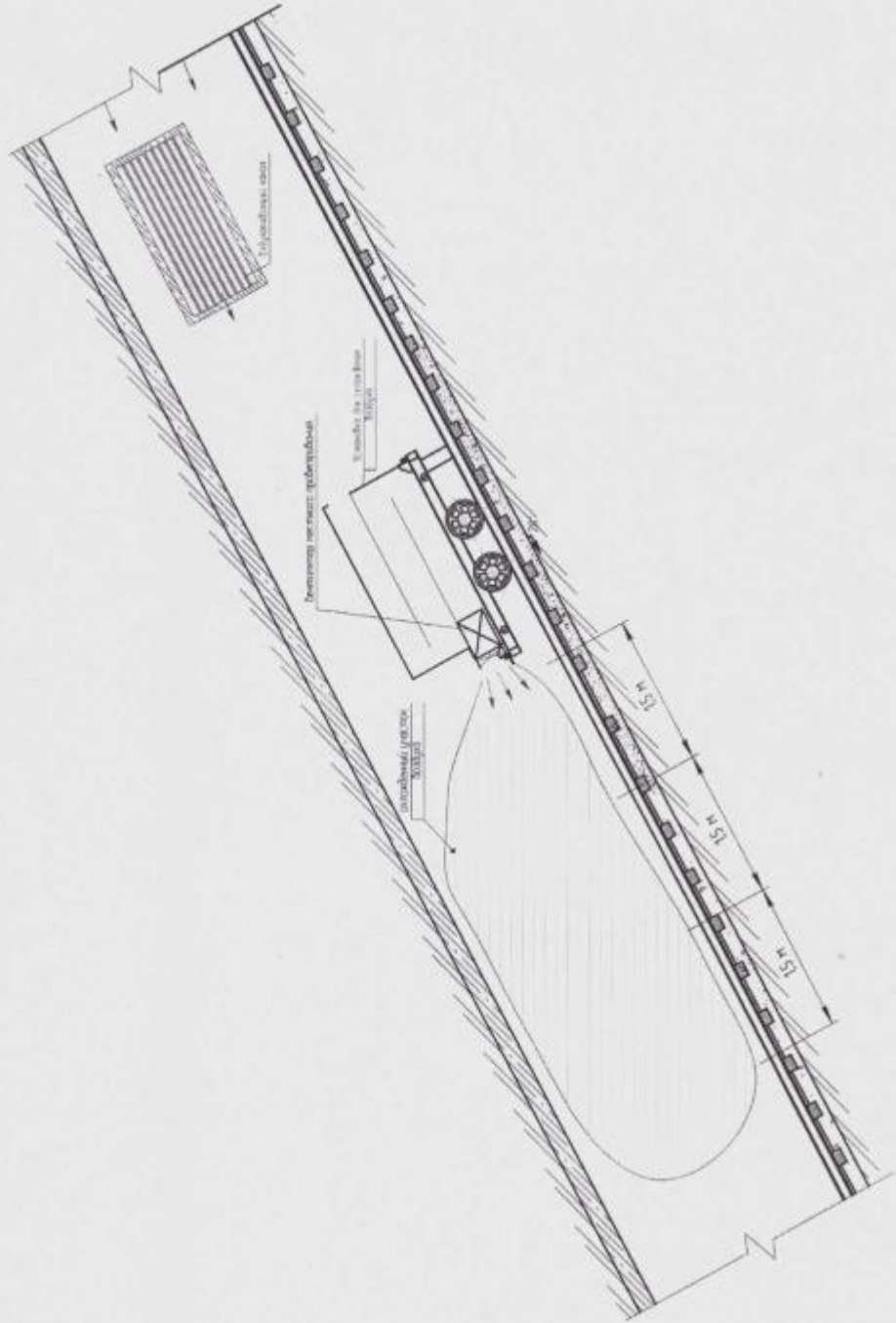
Приложение 1
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения
рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок на
основе применения водо-ледяных элементов.

Схема расположения горных выработок учебной шахты оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР



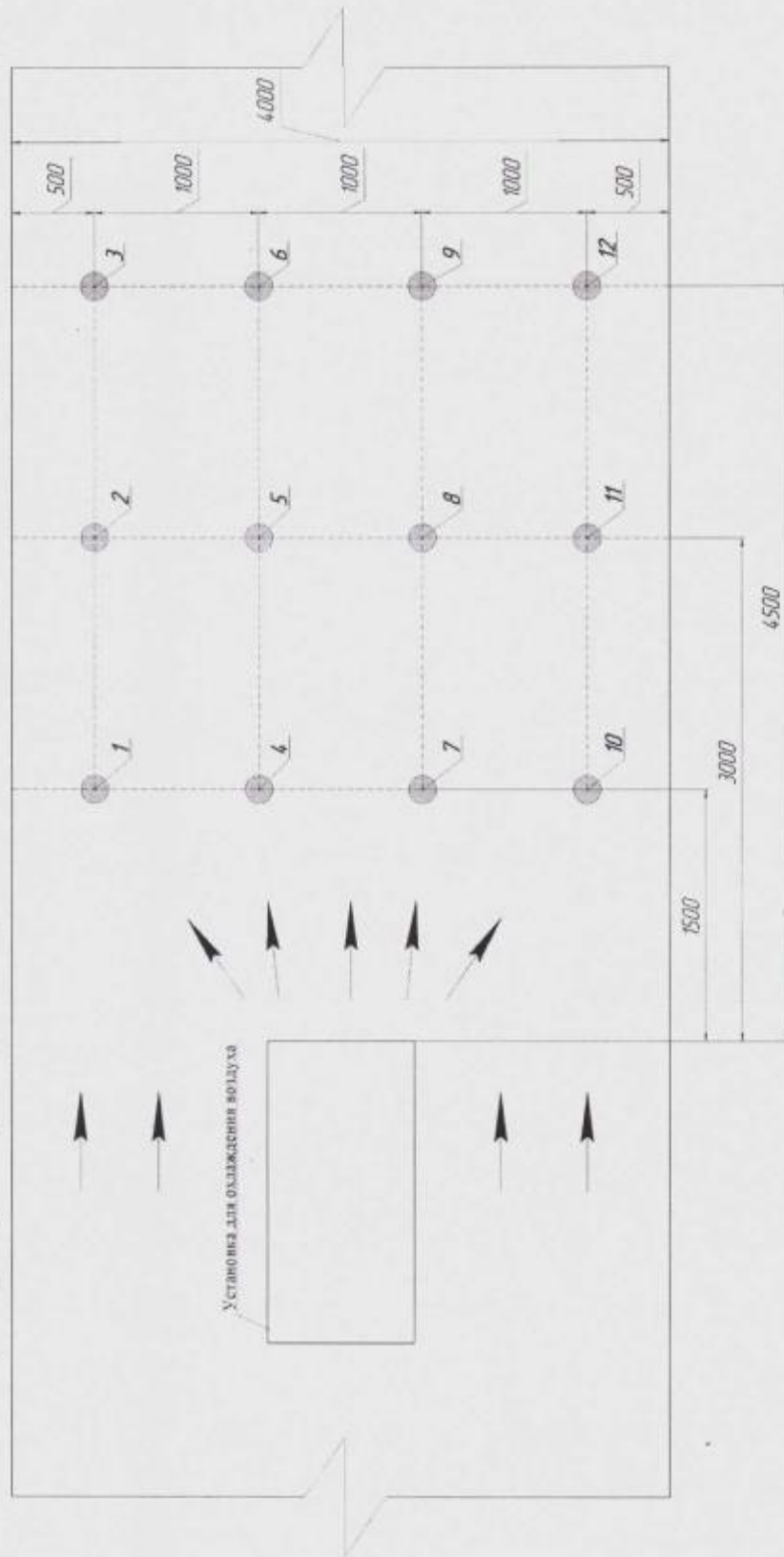
Приложение 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха в
локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов.

Схема расположения экспериментальной установки в наклонном стволе учебной шахты оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР



Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов.

Схема замеров параметров воздуха во время эксперимента в наклонном стволе учебной шахты оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР



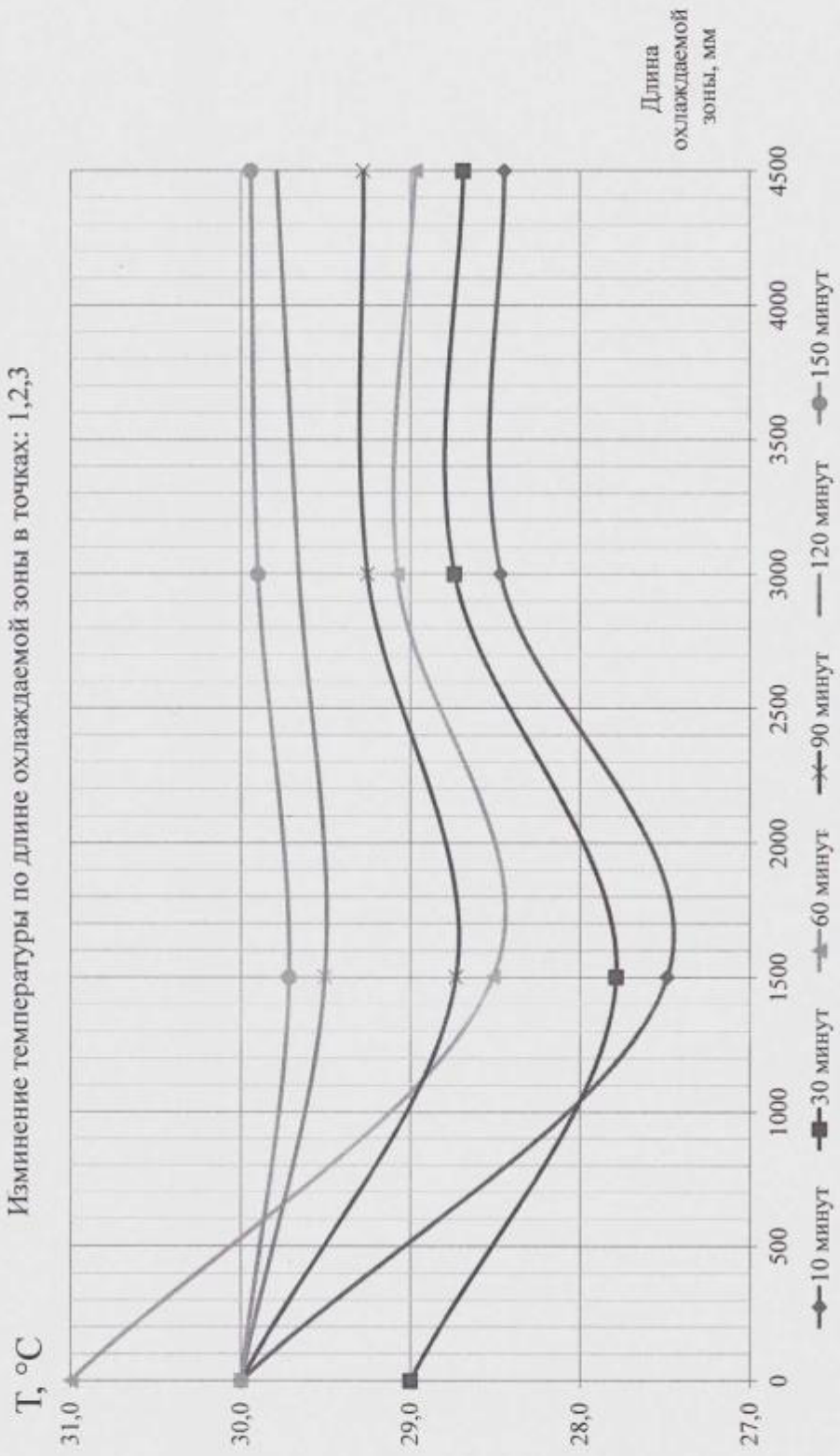
1-12 – точки замера температур воздуха в горной выработке во время эксперимента;
стрелками показано направление движения воздуха в горной выработке и на выходе с установки

Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов
Показания замеров параметров воздуха во время эксперимента в наклонном стволе учебной шахты оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР

Т _{время} , мин.	атм. давл.	Q _{воз в г.в.} , М ³ /с.	Q _{воз уст-ки} , М ³ /с.	отн. влаж. воз. ф.	t _{на входе в устье} , °С	t ₁ , °С	t ₂ , °С	t ₃ , °С	t ₄ , °С	t ₅ , °С	t ₆ , °С	t ₇ , °С	t ₈ , °С	t ₉ , °С	t ₁₀ , °С	t ₁₁ , °С	t ₁₂ , °С
10	755,0	6,75	3,2	24,0	30,0	27,5	28,5	28,4	18,5	19,1	20,0	18,9	19,9	20,9	27,8	28,7	29,1
20	750,0	7,2	3,2	24,0	30,0	27,7	28,6	28,5	18,9	19,7	20,2	19,0	20,5	21,2	27,9	28,8	29,2
30	750,0	6,84	3,2	25,0	29,0	27,8	28,7	28,7	19,9	19,9	21,0	19,2	21,1	21,8	28,0	28,8	29,2
40	755,0	7,29	3,2	24,0	30,0	28,0	28,9	28,8	20,6	20,7	21,2	19,9	21,5	22,5	28,0	28,9	29,2
50	750,0	7,02	3,2	24,0	31,0	28,2	29,0	28,9	21,0	21,2	22,2	20,4	21,8	22,7	28,1	29,1	29,3
60	755,0	6,75	3,2	24,0	31,0	28,5	29,1	29,0	21,4	21,6	22,6	21,1	22,6	23,3	28,2	29,2	29,4
70	762,0	7,02	3,2	25,0	31,0	28,5	29,2	29,0	21,7	21,9	23,1	21,4	23,2	23,9	28,4	29,3	29,5
80	752,0	6,75	3,2	25,0	30,0	28,6	29,2	29,2	22,1	22,5	23,4	22,0	23,4	24,4	28,8	29,3	29,6
90	755,0	7,2	3,2	25,0	30,0	28,7	29,3	29,3	22,7	22,9	24,2	22,7	23,6	24,9	28,9	29,4	29,7
100	755,0	6,75	3,2	25,0	30,0	29,0	29,4	29,5	22,9	23,5	24,2	23,1	24,2	25,2	29,2	29,5	29,7
110	755,0	6,93	3,2	26,0	31,0	29,2	29,5	29,7	23,6	23,9	24,5	23,3	24,5	25,5	29,3	29,6	29,8
120	752,0	7,02	3,2	25,0	30,0	29,3	29,6	29,7	23,9	24,6	25,2	24,1	25,4	26,1	29,5	29,7	29,8
130	750,0	6,75	3,2	26,0	30,0	29,5	29,7	29,8	24,3	25,3	26,1	24,3	25,8	26,8	29,5	29,8	29,8
140	750,0	6,93	3,2	25,0	30,0	29,6	29,9	29,9	25,1	25,7	26,4	25,0	26,5	27,2	29,6	29,9	29,9
150	750,0	6,75	3,2	24,0	30,0	29,7	29,9	29,9	25,6	26,4	26,9	25,8	27,0	27,6	29,8	30,0	30,0

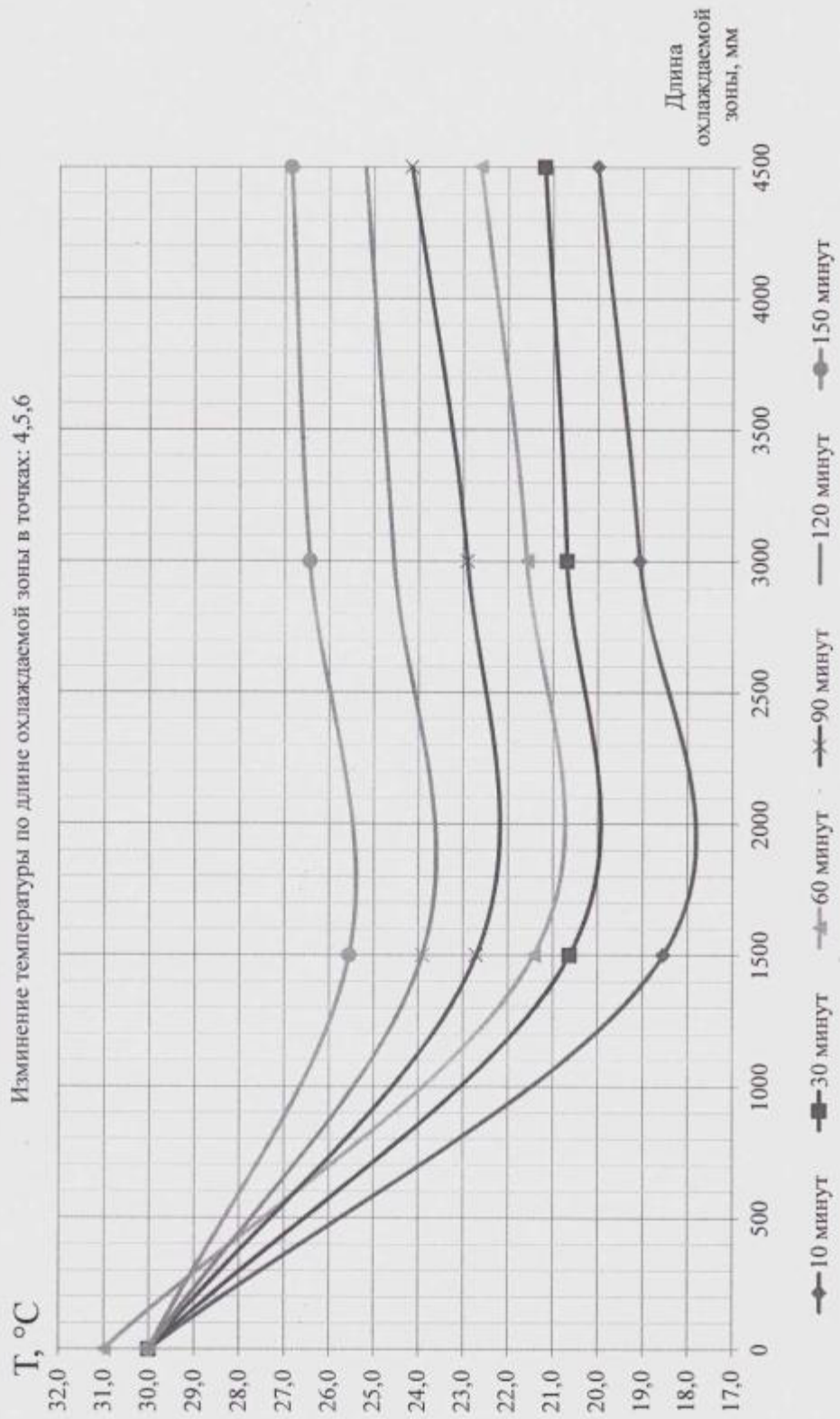
Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов

Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках: 1,2,3



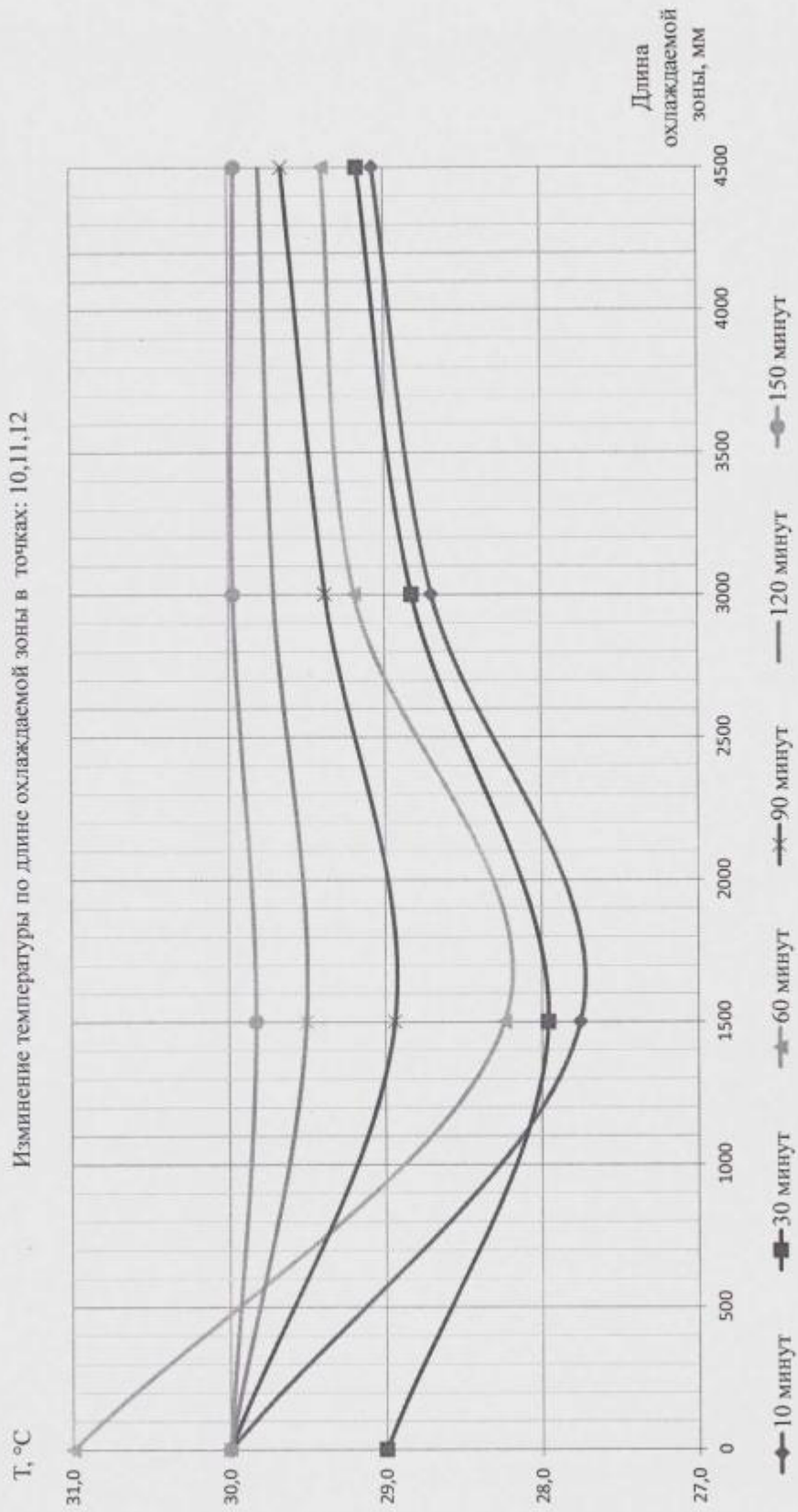
Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов

Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 4,5,6



Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов

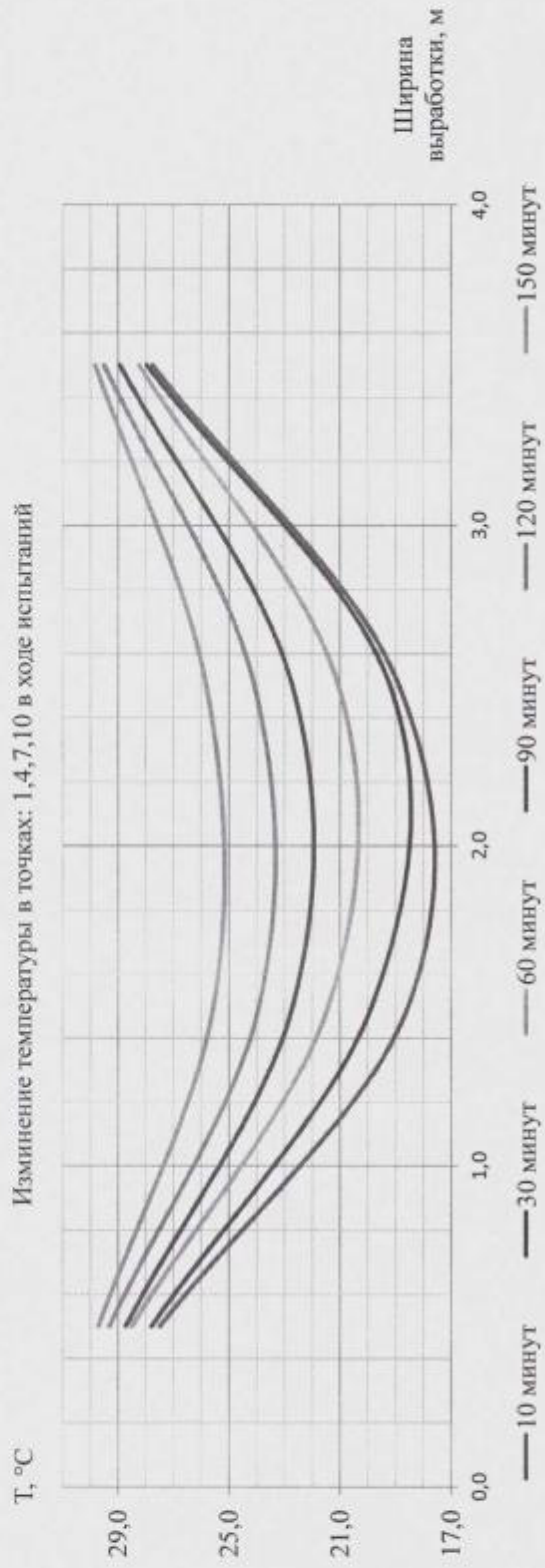
Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках: 10, 11, 12



Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов

Показания температур воздуха в точках: 1,4,7,10 в зависимости от времени

$T, \text{мин}$	t_1	t_4	t_7	t_{10}
10	27,5	18,5	18,9	27,8
30	27,8	19,9	19,2	28,0
60	28,5	21,4	21,1	28,2
90	28,7	22,7	22,7	28,9
120	29,3	23,9	24,1	29,5
150	29,7	25,6	25,8	29,8

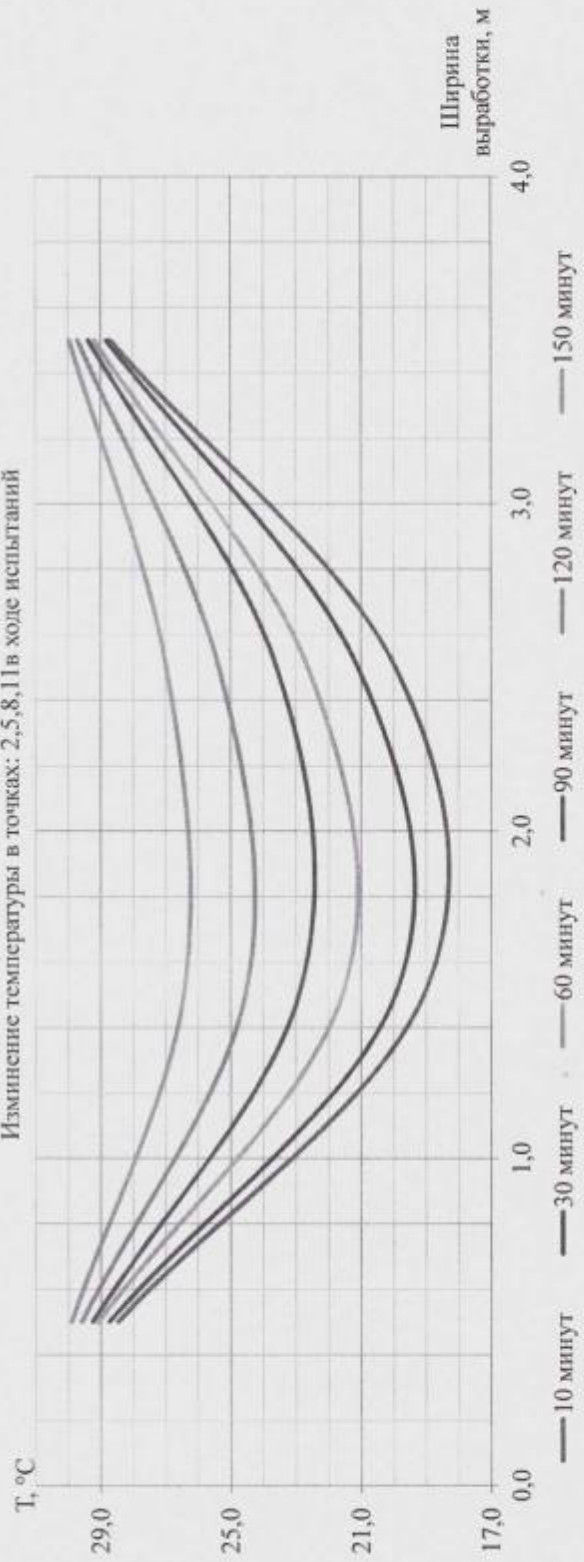


Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов

Показания температур воздуха в точках: 2, 5, 8, 11 в зависимости от времени

T, мин	t ₂	t ₅	t ₈	t ₁₁
10	28,5	19,1	19,9	28,7
30	28,7	19,9	21,1	28,8
60	29,1	21,6	22,6	29,2
90	29,3	22,9	23,6	29,4
120	29,6	24,6	25,4	29,7
150	29,9	26,4	27,0	30,0

Изменение температуры в точках: 2, 5, 8, 11 в ходе испытаний

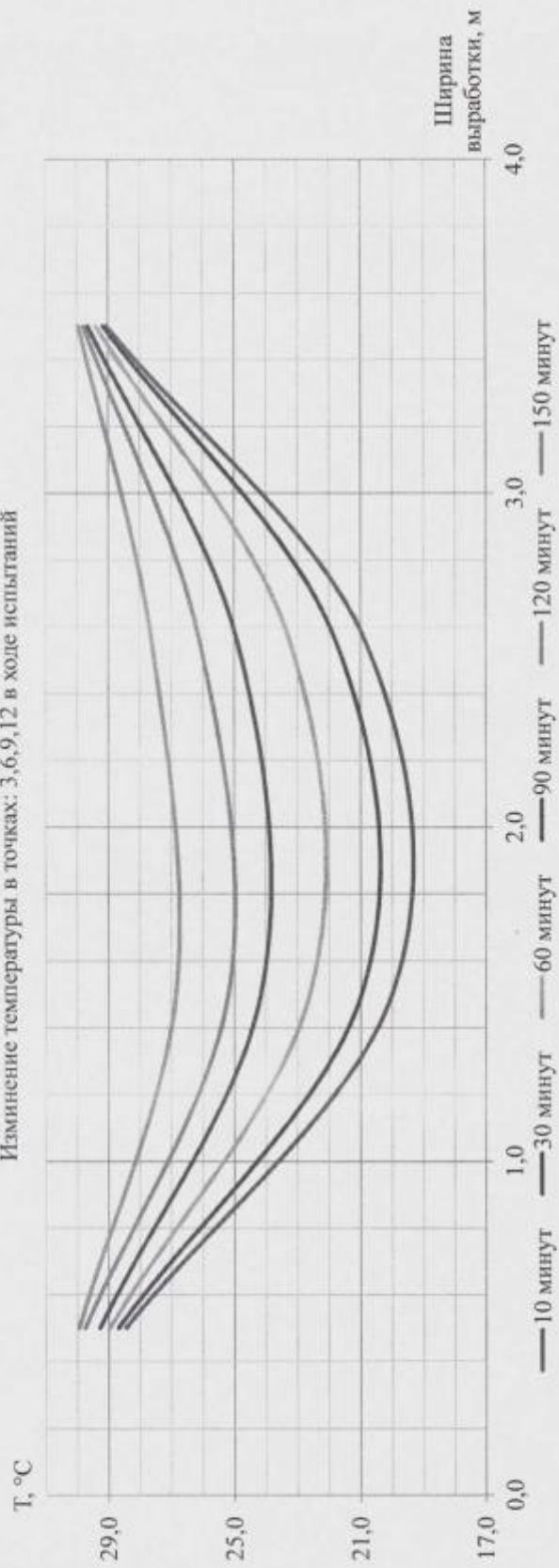


Продолжение приложения 2
к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов

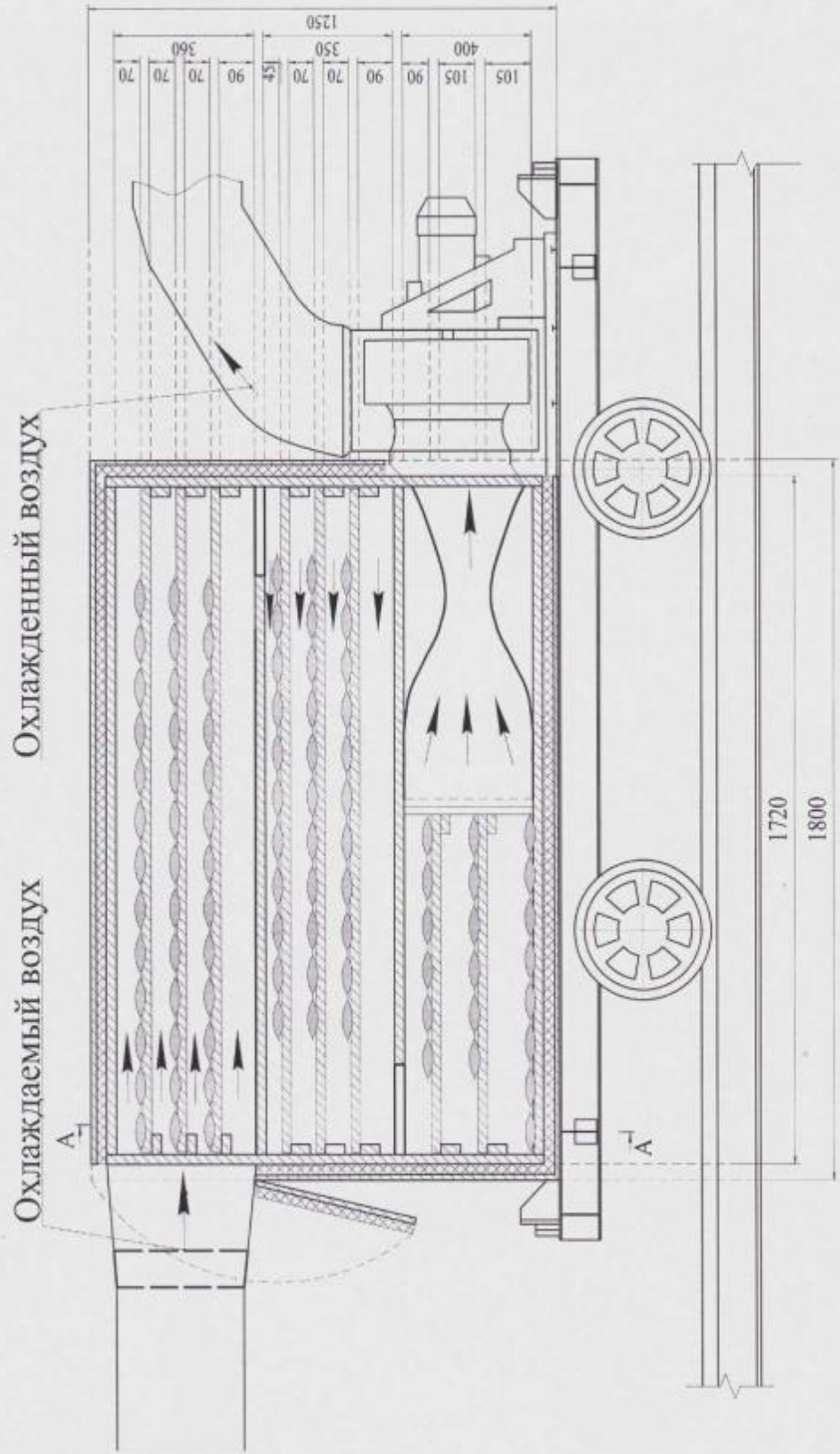
Показания температур воздуха в точках: 3,6,9,12 в зависимости от времени

T, мин	t ₃	t ₆	t ₉	t ₁₂
10	28,4	20,0	20,9	29,1
30	28,7	21,0	21,8	29,2
60	29,0	22,6	23,3	29,4
90	29,3	24,2	24,9	29,7
120	29,7	25,2	26,1	29,8
150	29,9	26,9	27,6	30,0

Изменение температуры в точках: 3,6,9,12 в ходе испытаний



Продолжение приложения 3
 к Акту опытно-промышленных испытаний установки для охлаждения рудничного воздуха
 в локальных зонах горных выработок на основе применения водо-ледяных элементов
 Схема установки охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне (поперечное сечение)





**МИНИСТЕРСТВО
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
(МЧС ДНР)**

ул. Щорса, 60, г. Донецк, 83050 тел./ факс (062) 340-62-38

Web: www.dnmchs.ru

Идентификационный код 51000092

E-mail: oper@mail.dnmchs.ru

29.10.2020 № 15/8284
на № 9/20 от 21.10.2020

Директору института
горного дела и геологии
д.т.н. профессору

Ю.Ф. Булгакову

О проведении испытаний
экспериментальной установки

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики, рассмотрев Ваше письмо от 21.10.2020 № 9/ 20 о возможности проведения испытаний экспериментальной установки для охлаждения рудничного воздуха, считает возможным проведение испытаний в учебной шахте Учебно- оперативного центра Оперативного ГВГСО г. Донецк МЧС ДНР.

Министр

А.А. Кострубицкий

Сурмилов Игорь Анатольевич- 071-300-71-37



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский

Приложение В

Копия технического задания на установку локального охлаждения воздуха в рабочей зоне горных выработок глубоких шахт

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
 ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
 ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
 «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



ВЕРЖДАЮ
 проректор по научной работе
 ДОННТУ

С.В. Борщевский

«10» февраля 2021 г.

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ
 на установку локального охлаждения воздуха
 в рабочей зоне горных выработок глубоких шахт

СОГЛАСОВАНО

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»

письмом № 01/121 от 05.02.2021

Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности

письмом № 08/172 от 09.02.2021

РАЗРАБОТАНО
 кафедрой «Охраны труда и аэрологии» ДОННТУ
 Ю.Ф. Булгаков

«10» февраля 2021 г.

Ответственный исполнитель:
 аспирант кафедры «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ
 К.А. Подвигин

«10» февраля 2021 г.

Донецк 2021 г.



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
 Ученый секретарь
 диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский

СОДЕРЖАНИЕ

1 Общие положения	3
1.1 Наименования организации-разработчика	3
1.2 Перечень документов, на основании которых разрабатывается ТЗ на установку	3
1.3 Плановые сроки начала и окончания работы по разработке технического задания на установку и созданию экспериментального (головного) образца установки	3
1.4 Источники и порядок финансирования работ	3
2 Назначение и цели создания установки	4
2.1 Назначение установки	4
2.2 Цели создания установки	4
3 Требования к установке	4
3.1 Требования к установке в целом	4
3.2 Требования к структуре и функционированию установки	4
3.3 Требования к условиям эксплуатации (ДСП 3.3.1.095-02)	11
3.4 Климатическое исполнение установки	11
3.5 Транспортирование и монтаж установки	11
3.6 Требования по надежности	12
3.7 Требования к материалам и оборудованию	12
4 Требования к контрольно-измерительным приборам	13
5 Требование к нормативным документам	13
6 Требования безопасности	13
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	14
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	17

1 Общие положения

Настоящее техническое задание (ТЗ) определяет требования к разработке, оснащению, изготовлению и контролю качества изготовления установки локального охлаждения воздуха в рабочей зоне горных выработок глубоких шахт (далее по тексту установка).

1.1 Наименования организации-разработчика

Разработка технического задания на установку и создание экспериментального (головного) образца установки является инициативой кафедры «Охрана труда и аэрология».

1.2 Перечень документов, на основании которых разрабатывается ТЗ на установку

ТЗ разработано в объеме выполнения НИР ДОННТУ № 8-15 от 01.01.2019 г. «Анализ и совершенствование мероприятий по основным видам аварийной опасности шахт ДНР», принятого решением Совета горного факультета о включении в план НИР ДОННТУ (протокол № 4 от 14.12.2018 года).

1.3 Плановые сроки начала и окончания работы по разработке технического задания на установку и созданию экспериментального (головного) образца установки

Работы по разработке технического задания на установку, а также по созданию экспериментального (головного) образца установки должны быть выполнены в срок: с 01.01.2019 г. по 31.01.2021 г.

Техническое задание на установку входит в отчет по НИР ДОННТУ № 8-15 от 01.01.2019 г. «Анализ и совершенствование мероприятий по основным видам аварийной опасности шахт ДНР» в качестве приложения. Техническое задание должно быть согласовано с ведущими НИИ по соответствующему направлению и утверждено в срок не позднее, чем один месяц после срока окончания выполнения НИР.

1.4 Источники и порядок финансирования работ

Финансирование работ по разработке технического задания к установке осуществляется в пределах общей нагрузки преподавателей, в ДОННТУ.

2 Назначение и цели создания установки

2.1 Назначение установки

Нормализация микроклимата по тепловому фактору в локальных зонах горных выработок.

2.2 Цели создания установки

Снижение температуры рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок до установленной Правилами безопасности в угольных шахтах (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более +26 °С).

3 Требования к установке

3.1 Требования к установке в целом

3.1.1 Разработка и изготовление установки должны базироваться на опыте изготовления и эксплуатации оборудования в горной промышленности. Необходимо, чтобы не только установка в целом, но и все ее составляющие проверялись изготовителем в соответствии с официально принятыми оценками опасности. Показатели, которые следует соблюдать в целях предотвращения возможных источников опасности, должны быть перечислены в документации.

3.1.2 Применяемые в конструкции установки материалы не должны быть опасными и вредными для обслуживающего персонала. Недопустимо применение материалов, не прошедших гигиеническую проверку и проверку на пожароопасность в установленном порядке.

3.1.3 Конструкция установки должна соответствовать современным требованиям технической эстетики, а при обслуживании современным требованиям эргономики.

3.2 Требования к структуре и функционированию установки

Конструкция установки должна быть блочной. Конструкция блоков должна предусматривать как автономное применение, так и объединение в батареи.

Габаритные характеристики блока (Приложение 1) должны позволять размещение его на шахтной платформе типа «П-2,5-02». Установка (рисунок 3.1) содержит выполненный в виде параллелепипеда корпус 1, выполненный из

оцинкованной листовой стали с теплоизолирующим слоем 2 из пенополистирола. В противоположные боковые стенки 3 и 4 вмонтированы входной и выходной люки 5 и 6 соответственно для прохода воздуха с откидными крышками 7, две другие противоположные боковые стенки выполнены съемными.

Внутренний объем корпуса 1 разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам 8, 9 воздухопроницаемыми перегородками 10 с проемами 11 на нечетное число теплообменных камер 12. При этом верхняя теплообменная камера взаимосвязана с входным люком 5, а нижняя камера с выходным люком 6. С внутренней стороны противоположных боковых стенок 3 и 4 расположены металлические направляющие 13, на которых размещены выдвижные перфорированные полки 14, например решетчатые. На каждой полке 14 размещены аккумуляторы холода 15, выполненные из термопластичного полимера, например полиэтилена толщиной не менее 150 мкм. Аккумулятор холода 15 выполнены с поперечными пережимами 16 вдоль его продольной оси, образующими ячейки 17 в виде цилиндра. В ячейках аккумулятора холода 15 размещен водосоляной лед 18 с концентрацией NaCl - 23 % (при атмосферном давлении 760 мм рт ст температура плавления/кристаллизации водосоляного льда составляет минус 21°C).

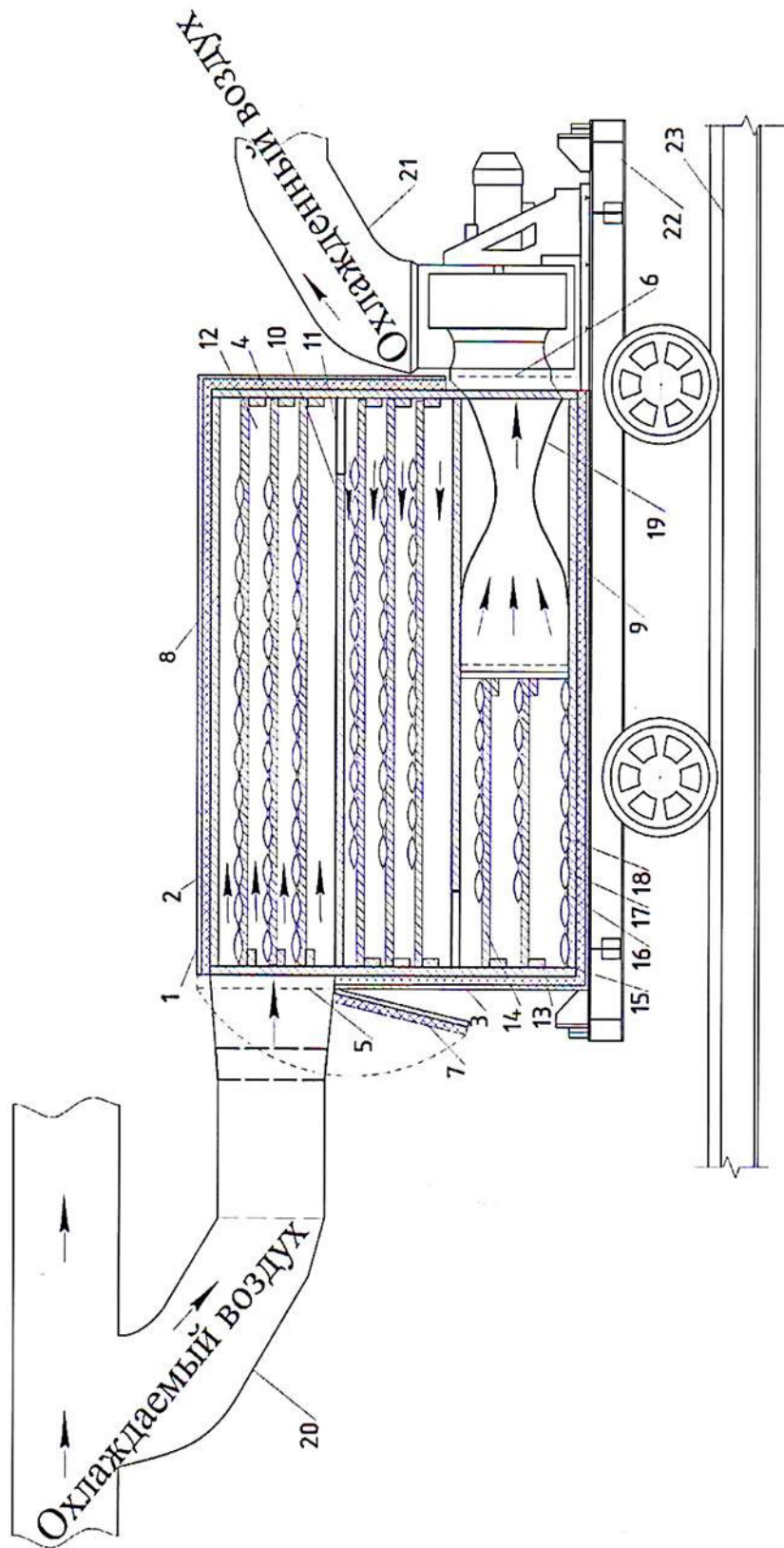


Рис.3.1 Схема установки локального охлаждения воздуха в рабочих зонах горных выработок глубоких шахт

Ячейки льдосоляных аккумуляторов холода (рис. 3.2) 15 расположены на полках 14 теплообменных камер 12 по длине полки 14 в один слой и в несколько рядов по ее ширине, причем нижний слой капсул расположен на поверхности нижней стенки 9 корпуса 1.

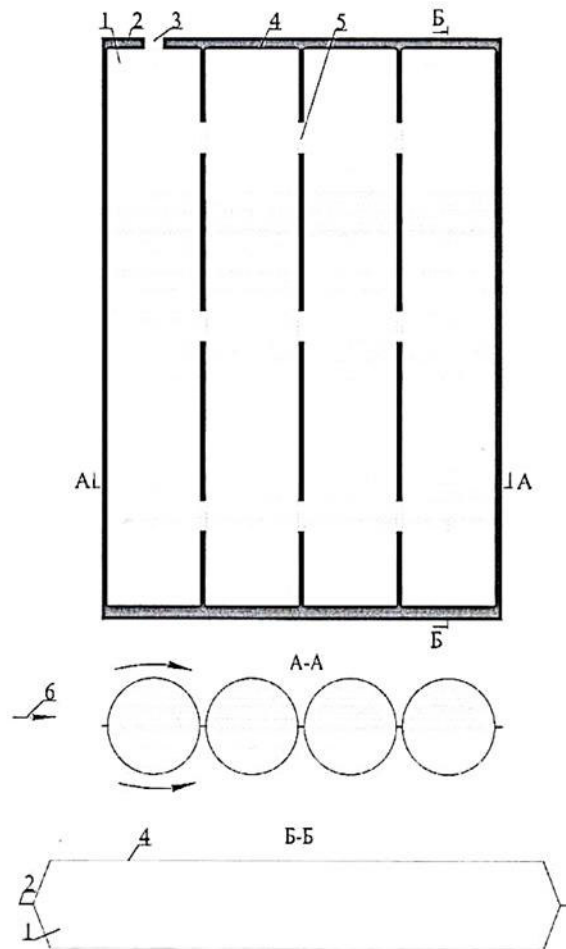


Рис. 3.2 – Схема аккумулятора холода:

1 – рассол; 2 – полиэтиленовый шов; 3 – заливное отверстие;
4 – ячейка аккумулятора холода; 5 – проход для рассола; 6 – направление движения воздуха вдоль аккумулятора холода.

В нижней теплообменной камере со стороны выходного люка 6 установлено взаимосвязанное с ним сопло Лавалья 19.

Для подачи охлаждаемого воздуха во внутренний объем установки предусмотрено размещение у передней боковой стенки корпуса вентилятора местного проветривания (на чертеже не показан) для взаимосвязи с установкой посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20, подсоединяемого к входному люку 3. Для направления охлажденного воздуха в локальную рабочую зону подземной горной выработки предусмотрен подсоединяемый к выходному люку 4 воздушный трубопровод 21. Установка смонтирована на платформе 22 шахтной вагонетки для транспортирования по железнодорожным путям 23 с помощью электровозов, лебедок или вручную.

Для подготовки установки к работе вручную открываются крышки 7 люков 5 и 6, вмонтированных в боковые стенки 3, 4 корпуса 1 с теплоизолирующим слоем 2. Посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20 вентилятор местного проветривания соединяется с входным люком 3 установки. Поток охлаждаемого воздуха по трубопроводу 20 подается через входной люк 3 в верхнюю теплообменную камеру 12, где разделяется на отдельные потоки, которые перемещаясь вдоль верхней стенки 8 и расположенных на направляющих 13 перфорированных полок 14, контактируют с поверхностью ячеек 15, размещенных на полках 14. Выполнение полок 14 перфорированными обеспечивает наиболее полный контакт воздуха с ячейками 15. Двигаясь вдоль ячеек 15 в виде вытянутого цилиндра и проходя места пережимов 16, воздушный поток сталкивается и обтекает их, в результате чего возникает его завихрение и поток приобретает турбулентное движение. По мере продвижения турбулентного потока воздуха по теплообменной камере и его контакта с поверхностью аккумуляторов холода происходит постепенное охлаждение воздуха. Турбулентное движение потока воздуха наряду со значительной площадью поверхности теплообмена и низкой температурой размещенного в капсуле 15 водосоляного льда 18 обеспечивают улучшение конвективного теплообмена, интенсифицируя процесс охлаждения. Размещение в ячейках водосоляного

льда обеспечивает снижение его температуры плавления за счет того, что кроме процесса плавления также протекает процесс растворения соли в воде, сопровождаемый понижением температуры плавления водосоляного льда. Кроме снижения температуры плавления водосоляного льда также происходит увеличение длительности этого процесса, что приводит к увеличению длительности рабочего цикла установки и снижению температуры воздуха подаваемого в локальную рабочую зону.

Воздух из верхней теплообменной камеры 12 через проемы 11 воздухо непроницаемых перегородок 10 последовательно перетекает в нижележащие камеры и подвергается дальнейшему охлаждению. Попадая в нижнюю камеру и контактируя в процессе перемещения с ячейками аккумуляторов холода, размещенными на полках и поверхности нижней стенки 9, воздух направляется в сопло Лавая 19, где происходит его дополнительное охлаждение за счет снижения абсолютной температуры и давления со значительным увеличением его скорости. Перемещаясь далее через воздушный трубопровод 21, с высокой скоростью интенсивно охлажденный поток воздуха поступает в горную выработку. При истечении охлажденного потока воздуха из воздушного трубопровода 21 с большой скоростью, он попадает в спутный поток горячего воздуха горной выработки и постепенно смешивается с ним, охлаждая локальную рабочую зону значительного объема. Сниженная температура и увеличенная скорость воздушного потока на выходе из установки позволяют устойчиво нормализовать микроклимат по тепловому фактору при температуре спутного потока нагретого воздуха в выработке до 34 °С со скоростью до 2 м/с на расстоянии до 6 м.

Так как время загрузки установки льдосоляными аккумуляторами холода составляет 420-600 секунд, а при этом наблюдается рост температуры в льдосоляных аккумуляторах холода на некоторую величину, предусматривается размещение на дне теплоизолированного корпуса в виде компенсаторов 50 льдосоляных аккумуляторов холода.

Льдосоляные аккумуляторы холода выполненные из термопластичного полимера, (полиэтилена толщиной не менее 150 мкм). Льдосоляные аккумуляторы холода выполнены с поперечными пережимами 1 (см. рис. 3.2) вдоль ее продольной оси, образующими ячейки 2 в виде вытянутого эллипсоида вращения. В капсулах размещен льдосоляной раствор 2 с концентрацией NaCl - 23 % (при атмосферном давлении 760 мм рт ст температура плавления/кристаллизации льдосоляного раствора составляет минус 21 °С).

3.2.1 Теплоизолированный корпус должен удовлетворять следующим требованиям:

- исключать утечки воздуха между отсеками и за его пределы;
- рассчитан на размещение в отсеках 450– 500 шт. аккумуляторов холода;
- предусматривать сообщение отсеков проемами для прохода воздуха (рис. 3.1), площадь которых, должна быть одинакова;
- на входе в установку конструкцией следует предусмотреть регулирование скорости подачи воздуха;
- коэффициент теплопроводности для теплоизолирующих материалов – 0,06-0,10 Вт/(м·К);

3.2.2 Выдвижные полки должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечить ориентацию потока воздуха с аккумуляторами холода (см. рис. 3.1);
- выдерживать нагрузку, создаваемую весом аккумуляторов холода;
- конструкция полок должна соответствовать современным требованиям эргономики к выдвижным конструкциям.

3.2.3 Гибкий вентиляционный трубопровод необходим для соединения установки с вентилятором местного проветривания, а так же для направления (подачи) охлажденного воздуха непосредственно на рабочее место. В зависимости от типа вентилятора местного проветривания (далее

ВМП) следует применять трубопровод диаметром 0,6 или 0,8 м. Вентиляционный трубопровод должен соединяться с ВМП с помощью быстроразъемного соединения (накидного замка для мягких труб).

3.2.4 ВМП может применяться как с электрическим, так и с пневматическим двигателем, должен иметь номинальную подачу от 1,5 до 4,5 м³/с. ВМП при эксплуатации может размещаться в подвешенном состоянии (подвешивается к крепи горной выработки) или на шахтной платформе типа «П-2,5-02» и иметь для этого приспособления.

3.3 Требования к условиям эксплуатации (ДСП 3.3.1.095-02)

Установка локального охлаждения рудничного воздуха предназначена для снижения температуры рудничного воздуха до 26 °С согласно требованию Правил безопасности. Установка должна обеспечить снижение температуры воздуха в: условиях локальных зон (на расстоянии до 4 м) горных выработок глубоких шахт (непосредственно на рабочих местах); технологических зонах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов (более 100 кВт) создающих значительные техногенные тепловые потоки, нагревающие воздух в стесненном рабочем пространстве. Охлаждаемый воздух должен удовлетворять требованиям (Приложение 2):

- температура воздуха в локальной зоне горной выработки, °С от +26 до +35;
- относительная влажность воздуха локальной зоны горной выработки, при температуре (35±2)°С - 65÷95% (с конденсацией влаги);
- скорость движения воздуха в локальной зоне горной выработке не должна превышать 1±0,2 м/с.

3.4 Климатическое исполнение установки

Установка должна отвечать климатическому исполнению У, категория 5 согласно ГОСТ 15150-69.

3.5 Транспортирование и монтаж установки

Конструкцией установки должны обеспечиваться удобство транспортирования и монтажа, эргономичность при осуществлении

технического обслуживания и эксплуатации для чего должны быть предусмотрены:

– стропные устройства или конструктивные элементы (места) для захвата грузоподъемными средствами, используемыми в процессе транспортировки и монтажа. Строповые устройства или предусмотренные для строповки конструктивные элементы установки, а также съемные захватные приспособления должны быть рассчитаны и испытаны на подъемную массу, учитывающую массу оборудования, конструктивных элементов закрепленных на установке до его подъема и установки в проектное положение на месте эксплуатации;

– приспособления для транспортирования на шахтной платформе типа «П-2,5-02», или для перемещения четырьмя рабочими вручную;

– на месте эксплуатации установка может размещаться на платформе, на почве или в подвешенном состоянии и иметь для этого приспособления.

3.6 Требования по надежности

3.6.1 Для установки должны быть выполнены следующие требования по надежности:

- срок службы 5 лет;
- коэффициент технического использования не менее 0,85;
- наработка до отказа, не менее 1000 часов.

3.7 Требования к материалам и оборудованию

3.7.1 Применяемые материалы должны быть коррозионностойкими и износостойкими по отношению к шахтным агрессивным средам, внешним воздействующим факторам.

3.7.2 Используемые материалы должны быть допущены к применению в горнодобывающей промышленности.

3.7.3 Поставляемые материалы для изготовления элементов установки должны иметь сертификаты или паспорта предприятий-изготовителей.

4 Требования к контрольно-измерительным приборам

Все средства измерения, поставляемые комплектно с установкой должны быть утвержденного типа и иметь свидетельство Госстандарта об утверждении типа средств измерения (Внесены в Госреестр средств измерительной техники ДНР).

5 Требование к нормативным документам

Установка должна отвечать требованиям следующих нормативных документов:

НПАОТ 10.0-1.01-16 Правила безопасности в угольных шахтах. Государственный Комитет горного и технического надзора ДНР и Министерства угля и энергетики ДНР от 18 апреля 2016 г. №36/208.

ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Воздух рабочей зоны. Общие санитарно-гигиенические требования.

СНиП2.04.05-90. Отопление, вентиляция и кондиционирование.

ДСП 3.3.1.095-02. Государственные санитарные правила и нормы (предприятия горной промышленности).

6 Требования безопасности

6.1 На всасывающем отверстии вентилятора должна быть установлена защитная решетка со степенью защиты не менее IP 10 по ГОСТ 17494-87.

6.2 Для работы на установке должны допускаться люди, прошедшие обучение.

6.3 Перед включением установки в работу персонал должен ее осматривать на отсутствие механических повреждений. Перед загрузкой аккумуляторов холода проверить работу установки на холостом ходу.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Основные требования к охлаждаемому воздуху

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура, К	от 299,15 до 308,15
2	Относительная влажность, %	до 100
3	Запыленность, мг/м ³	до 100
4	Барометрическое давление, МПа	от 0,097 до 0,12
5	Скорость движения воздуха в локальной зоне горной выработки, м/с	не менее 0,2

Основные технические требования к установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура воздуха на выходе из установки (10...150 мин.), °С при температуре рудничного воздуха на входе 32 – 33 °С, расходе воздуха через установку 0,5 м ³ /с, начальной температуре аккумуляторов холода минус 18 °С	17...20
2	Скорость движения воздуха на выходе из установки, м/с, не более	4
3	Время подготовки установки к работе, мин., не более	15
4	Масса, не более (без вентилятора), кг, не более	150
5	Габаритные размеры в сборе (без вентилятора), м: ширина/длина/высота, не более	1,1/2,0/1,3



ГКНТ ДНР

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«МАКЕЕВСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ПО БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТ В ГОРНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ»
(МАКНИИ)

ул. Лихачева, 60, Горняцкий район, г. Макеевка, 86132,
телефоны: (0623) 22-22-18, факс (0623)22-19-00
e-mail: maknii2014@inbox.ru, идентификационный код 00174088

09.02.2021 № 08/172

на № 2/21 от 14.01.2020

Директору института
горного дела и геологии
ГОУВПО
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Булгакову Ю.Ф.

83001, г. Донецк, ул. Артёма, 58

О согласовании
«Техническое задание...»

Рассмотрев «Техническое задание на установку локального охлаждения воздуха в рабочей зоне горной выработки глубоких шахт» МАКНИИ, согласовывает их без замечаний.

Заместитель директора
по научной работе

В.А. Безбородов

Тишин Р.А. (0623) 22-22-18



МЧС ДНР

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОСПАСАТЕЛЬНОГО ДЕЛА, ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
И ГРАЖДАНСКОЙ ЗАЩИТЫ «РЕСПИРАТОР»
МИНИСТЕРСТВА ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ
СИТУАЦИЯМ И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
(НИИГД «РЕСПИРАТОР»)

ул. Артема, 157, г. Донецк, 283048, тел. (062) 332-78-01, факс 332-78-78
Web: www.dnmchs.ru Идентификационный код 51001452 E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

05.02.2021 № 01/101

На № 1/21 от 14.01.2021

Директору Института
горного дела и геологии
Донецкого национального
технического университета
Ю.Ф. Булгакову

Рассмотрение и согласование
Технического задания

Уважаемый Юрий Федорович!

Рассмотрев «Техническое задание на установку локального охлаждения воздуха в рабочей зоне горных выработок глубоких шахт» НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР согласовывает их без замечаний.

Первый заместитель директора
по научной работе НИИГД «Респиратор»

Мамаев

В.В. Мамаев



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01
И.А. Бершадский

Приложение Г

Копия справки использования и внедрения результатов диссертационной работы
в НИР ГОУВПО «ДОННТУ»



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

15.11.2022 № 30-12/1922

Диссертационный совет Д 01.008.01 при
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На № _____

СПРАВКА

использования и внедрения результатов диссертационной работы Подвигина Константина Александровича на тему «Нормализация температурного режима в локальной зоне горной выработки для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих»

Настоящей справкой подтверждается внедрение результатов диссертационных исследований аспиранта кафедры «Охрана труда и аэрология» Подвигина К.А. во время выполнения плановой научно исследовательской работы ГОУВПО «ДОННТУ» Н-2019-4 от 01.01.2019 г. «Анализ и совершенствование мероприятий по основным видам аварийной опасности шахт ДНР» (01.01.2019 – 31.01.2021 г.). В научно-исследовательской работе использована методика Подвигина К.А. по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки.

В рамках выполнения НИР проведены опытно-промышленные испытания экспериментального образца установки охлаждения воздуха, а также разработано «Техническое задание на установку для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки». Согласовано с «Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» и «Государственный Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности».

Проректор по научной работе
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
д-р техн. наук, профессор

Начальник НИЧ
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
д-р техн. наук, доцент


Декан горного факультета
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
канд. техн. наук, доцент

Заведующий кафедрой «Охрана труда и
аэрология»
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
канд. техн. наук, доцент

 С.В. Борщевский

 К.Н. Лабинский

 А.Н. Корчевский

 А.Л. Кавера

СОГЛАСНО ОРГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01

 И.А. Бершадский



Приложение Д

Копия справки внедрения результатов диссертационных исследований в учебный процесс ГОУВПО «ДОННТУ»



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

11.11.2021 № 30-12/182a

На № _____

Диссертационный совет Д 01.008.01 при
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

СПРАВКА

о внедрении результатов диссертационной работы Подвигина Константина Александровича на тему «Нормализация температурного режима в локальной зоне горной выработки для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.26.01 – «Охрана труда» (по отраслям) (технические науки)

Результаты диссертационной работы Подвигина К.А. «Нормализация температурного режима в локальной зоне горной выработки для обеспечения безопасных условий труда горнорабочих», внедрены в учебный процесс ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», при чтении лекций для студентов специальности 21.05.04-«Горное дело» специализации «Технологическая безопасность и горноспасательное дело» по дисциплине «Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело», что отражено в рабочей программе дисциплины и методических указаниях для проведения лабораторных работ указанной дисциплины.

Использование результатов диссертационной работы позволяет повысить уровень подготовки горных инженеров по проектированию систем охлаждения воздуха в ходе выполнения аварийно-восстановительных и ремонтных работ в подземных горных выработках.

Проректор по научной работе
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
д-р техн. наук, профессор

 С.В. Борщевский

Начальник учебного отдела
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
канд. техн. наук, доцент

 Б.В. Гавриленко

Декан горного факультета
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
канд. техн. наук, доцент

 А.Н. Корчевский

Заведующий кафедрой «Охрана труда и
аэрология»
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
канд. техн. наук, доцент

 А.Л. Кавера

СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01

 И.А. Бершадский

Приложение Е

Копия акта внедрения результатов диссертационного исследования в ОГВГСО

**АКТ**

использования и внедрения результатов диссертационной работы Подвигина К.А. на тему «Обоснование параметров противотепловой защиты горнорабочих в условиях глубоких шахт»

В государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», на кафедре «Охрана труда и аэрология» выполнена научно исследовательская работа Н-2019-4 от 01.01.2019 г. «Анализ и совершенствование мероприятий по основным видам аварийной опасности шахт ДНР». В ходе ее выполнения разработан и испытан в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ГВГСО ГВГСС МЧС ДНР экспериментальный образец установки локального охлаждения воздуха в рабочих зонах горных выработок глубоких шахт (далее установка), показавший эффективность применения способа для охлаждения воздуха на основе применения водо-ледяных охлаждающих элементов. Разработано и согласовано с Государственным научно-исследовательским институтом горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» и Государственным Макеевским научно-исследовательским институтом по безопасности работ в горной промышленности Техническое задание на установку.

На основании выполненной работы разработаны Методические рекомендации по определению параметров установки локального охлаждения воздуха в рабочих зонах горных выработок глубоких шахт, в которые вошли результаты исследований из диссертационной работы аспиранта кафедры «Охрана труда и аэрология» ДОН НТУ Подвигина К.А.

Настоящим актом подтверждается, что научные исследования Подвигина К.А. по нормализации температуры воздуха в горных выработках глубоких шахт являются актуальными для применения в ходе горноспасательных работ и рекомендуются при разработке и эксплуатации промышленных установок локального охлаждения воздуха в рабочих зонах горных выработок глубоких шахт.

Первый заместитель ОГВГСО МЧС
 ДНР - руководитель УОЦ ОГВГСО

Д.В. Слизаров



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
 Ученый секретарь
 диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский

Приложение Ж

Копия методических рекомендаций по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
ДОННТУ

С.В. Борщевский

«11» марта 2021 г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ УСТАНОВКИ
ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ
ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

СОГЛАСОВАНО

Первый заместитель директора по научной работе государственного научно-исследовательского института горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «РЕСПИРАТОР», д-р техн. наук, с.н.с.
Василь В.В. Мамиса

«10» марта 2021 г.



РАЗРАБОТАНО

Аспирант кафедры «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ
К.А. Подвигин

«03» марта 2021 г.

Научный руководитель
заведующий кафедрой
«Охрана труда и аэрология»
ДОННТУ, д-р техн. наук, проф.
Ю.Ф. Булгаков

«05» марта 2021 г.

Донецк 2021



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01

И.А. Бершадский

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ И ПРИМЕНЕНИЮ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ	4
1.1 Методика расчета параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки.....	4
1.2 Разработка тактики и обоснование возможной области применения установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки	6
2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ ШАХТ	9
2.2 Разработка математической модели теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода.....	13
2.3 Исследование процессов теплообмена воздушной струи при контакте с льдосоляной смесью.....	17
2.4 Исследование дальности подачи струи охлажденного воздуха в проветриваемую горную выработку.....	20
2.5 Исследование деформации и распада головной части охлажденной струи воздуха....	23
3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СТРУИ ОХЛАЖДЕННОГО ВОЗДУХА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ.....	35

ВВЕДЕНИЕ

К мероприятиям, направленным на нормализацию микроклимата по тепловому фактору в условиях горных выработок глубоких горизонтов угольных шахт относятся (увеличение скорости движения воздушной струи, а также ее осушение, расширение и поддержание воздухоподающих выработок, искусственное охлаждение с помощью холодильных установок и т.п.). Однако следует отметить, что перечисленные мероприятия требуют значительных материальных затрат и времени. Вместе с тем, во время ведения аварийно-восстановительных и горноспасательных работ возникает потребность снижения температуры рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок (от 3 до 6 м) до установленной Правилами безопасности в угольных шахтах (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более плюс 26 °С). В связи с этим обоснованию параметров установки охлаждения рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок глубоких шахт, является актуальной научно-технической задачей .

1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАСЧЕТУ ПАРАМЕТРОВ И ПРИМЕНЕНИЮ УСТАНОВКИ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА В ЛОКАЛЬНОЙ РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ПОДЗЕМНОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

1.1 Методика расчета параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки

Установка охлаждения воздуха (Рисунок 1.1) содержит корпус 1, выполненный из оцинкованной листовой стали с теплоизолирующим слоем 2. В противоположные торцевые стенки 3 и 4 вмонтированы входной и выходной локи 5 и 6 соответственно для прохода воздуха с откидными крышками 7, две другие противоположные боковые стенки выполнены съемными.

Внутренний объем корпуса 1 разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам 8, 9 воздухонепроницаемыми перегородками 10 с проемами 11 на нечетное число теплообменных камер 12. При этом верхняя теплообменная камера взаимосвязана с входным локом 5, а нижняя камера с выходным локом 6. С внутренней стороны противоположных боковых стенок 3 и 4 расположены направляющие 13, на которых размещены выдвижные решетчатые полки 14.

На каждой полке 14 размещены аккумуляторы холода 15, выполненные из полиэтилена толщиной 150 мкм. Аккумуляторы холода выполнены с поперечными пережимами 16 вдоль своей продольной оси, образующими ячейки 17 в виде вытянутого эллипсоида вращения. В ячейках 17 размещена ЛС 18 с концентрацией $\text{NaCl} - 23\%$. Капсулы аккумулятора холода 15 расположены на полках 14 теплообменных камер 12 по длине полки 14 в один слой и в несколько рядов по ее ширине корпуса 1. В нижней теплообменной камере со стороны выходного лока 6 установлено взаимосвязанное с ним сопло 19.

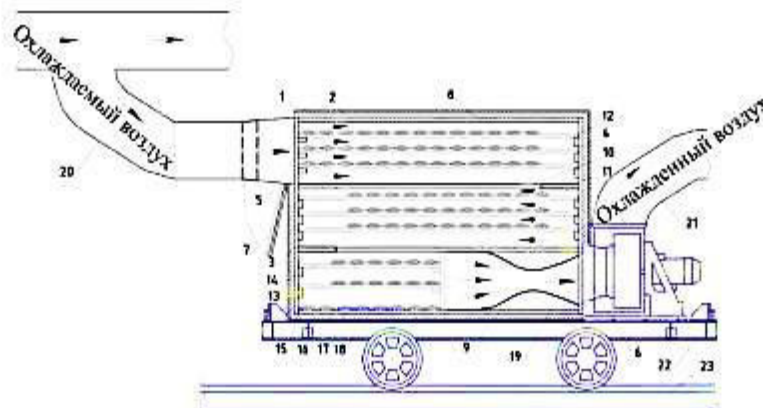


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки

Для подачи охлаждаемого воздуха во внутренний объем устройства предусмотрено размещение у передней боковой стенки корпуса вентилятора местного проветривания, для взаимосвязи с устройством посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20, подсоединяемого к входному локсу 3. Для направления охлажденного воздуха в локальную рабочую зону подземной горной выработки предусмотрен подсоединяемый к выходному локсу воздушный трубопровод 21. Устройство смонтировано на платформе 22 шахтной вагонетки для транспортирования по железнодорожным путям 23 с помощью электровоза, лебедки или вручную.

Расчет параметров установки охлаждения воздуха, в том числе определение количества аккумуляторов холода выполняются в зависимости от времени защитного действия.

Целью расчета является определение:

- температуры в установке охлаждения воздуха по ее длине;
- скорости воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха;
- коэффициента скорости распада струи охлажденного воздуха;
- диаметра отверстия (сопла) на выходе из установки охлаждения воздуха;
- времени распада струи охлажденного воздуха;
- дальности подачи струи охлажденного воздуха;
- температуры воздуха на различном расстоянии от установки охлаждения воздуха по ходу движения струи охлажденного воздуха.

Исходные данные для расчета:

- T - температура воздуха в установке, К;
- T_0 - начальная температура воздуха в горной выработке, К
- T_1 - температура воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха, К;
- x - расстояние от входа в установку охлаждения воздуха, м;
- L - длина установки охлаждения воздуха, м;
- Q - расход воздуха через установку охлаждения воздуха, м³/с;
- w - скорость воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха, м/с;
- S - площадь поперечного сечения выработки, м²;
- S_0 - площадь выходного отверстия из установки охлаждения воздуха, м²

Порядок расчета

1. Находим температуру воздуха по длине установки охлаждения воздуха

$$T = T_0 \cdot \exp\left(\frac{-0.05 \cdot x}{L}\right), \quad (1.1)$$

2. Находим скорость воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха

$$w = \frac{Q}{S_0}, \quad (1.2)$$

3. Определяем коэффициент скорости распада струи охлажденного воздуха

$$A = 0.16 \cdot w^2, \quad (1.3)$$

4. Находим диаметр отверстия сопла на выходе из установки охлаждения воздуха

$$d = 2 \cdot \left(\frac{S}{\pi} \right)^{0.5}, \quad (1.4)$$

5. Определяем время распада струи охлажденного воздуха

$$\tau = \frac{\ln \left(\frac{S}{S_0} \right)}{A}, \quad (1.5)$$

6. Находим дальность подачи струи охлажденного воздуха

$$x = 5 \cdot d \cdot \ln \left(\frac{1 + 0.2 \cdot w \cdot \tau}{d} \right), \quad (1.6)$$

7. Определяем температуру воздуха в зависимости от расстояния до установки охлаждения воздуха

$$T = T_0 - (T_0 - T_1) \cdot \exp \left(\frac{-0.1 \cdot x}{w} \right), \quad (1.7)$$

Если ожидаемая температура на заданном расстоянии превышает допустимую 299 К (26 °С), то необходимо либо приблизить установку охлаждения воздуха к месту ведения горноспасательных работ, либо увеличить скорость воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха.

1.2 Разработка тактики и обоснование возможной области применения установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки

Цель создания установки охлаждения воздуха – снижение температуры рудничного воздуха в локальных зонах горных выработок во время аварийных и аварийно-спасательных работ до установленной Правилами безопасности в угольных шахтах (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более плюс 26 °С).

Конструкция установки охлаждения воздуха должна быть блочной. Конструкция блоков должна предусматривать как автономное применение, так

и объединение в батареи. Состав установки охлаждения воздуха и назначение ее функциональных модулей приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1.
Состав установки охлаждения воздуха и назначение функциональных модулей

Наименование модуля	Количество единиц	Назначение модуля
корпус теплоизолированный	1	изоляция внутреннего объема установки охлаждения воздуха от притоков тепла извне и утечек холода наружу
перфорированная полка	8	размещение аккумулятора холода в теплообменных камерах теплоизолированного корпуса
воздухонепроницаемая перегородка	2	разделение внутреннего объема установки охлаждения воздуха на теплообменные камеры и исключение утечек между ними
проем в воздухонепроницаемой перегородке	2	сообщение теплоизолированных камер для перетекания охлаждаемого воздуха
аккумулятор холода	500	охлаждение воздуха (источник холода)
вентилятор местного проветривания	1	продувка воздуха через установки охлаждения воздуха
шибер	1	регулирование скорости продуваемого воздуха через камеры установки охлаждения воздуха
гибкий вентиляционный трубопровод	2	соединение вентилятора местного проветривания с теплоизолированным корпусом установки охлаждения воздуха, а так же направление исходящего с установки охлаждения воздуха в рабочую зону
быстроразъемное соединение (накидной замок для мягких труб)	1	крепление гибкого трубопровода на корпусе вентилятора местного проветривания
люк	2	герметизация внутреннего пространства установки охлаждения воздуха вне рабочее время

Теплоизолированный корпус установки охлаждения воздуха должен удовлетворять следующим требованиям:

- исключать утечки воздуха между отсеками и за его пределы;
- размещать в отсеках 500 шт. аккумуляторов холода;
- предусматривать сообщение отсеков проемами для прохода воздуха, площадь которых, должна быть одинакова;
- на входе в установку охлаждения воздуха конструкцией должно быть предусмотрено устройство для регулировки скорости подачи воздуха;

Выдвижные полки должны удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечить ориентацию потока воздуха с аккумуляторами холода;
- выдерживать нагрузку, создаваемую весом аккумуляторов холода;

Гибкий вентиляционный трубопровод необходим для соединения установки охлаждения воздуха с вентилятором местного проветривания, а так

же для направления (подачи и транспортировки) охлажденного воздуха непосредственно на рабочее место. В зависимости от типа вентилятора местного проветривания (далее ВМП) следует применять трубопровод диаметром 0,6 или 0,8 м. Вентиляционный трубопровод должен соединяться с ВМП с помощью быстроразъемного соединения (накидного замка для мягких труб).

ВМП может применяться как с электрическим, так и с пневматическим двигателем, должен иметь номинальную подачу от 1,5 до 4,5 м³/с. ВМП при эксплуатации может размещаться в подвешенном состоянии (подвешивается к крепи горной выработки) или на шахтной платформе типа «П-2,5-02» и иметь для этого приспособления.

Установка охлаждения воздуха может быть применена:

- 1) в условиях локальных зон (на расстоянии до 6 м) горных выработок глубоких шахт (непосредственно на рабочих местах);
- 2) в технологических зонах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов (более 100 кВт) создающих значительные техногенные тепловые потоки;
- 3) при устранении последствий аварии или инцидента (стыковка конвейерной ленты и т.д.);
- 4) при выполнении горноспасательных работ (проведению специальных поисковых выработок и т.д.).

Охлаждаемый воздух должен удовлетворять требованиям таблицы 1.2.

Таблица 1.2.

Основные требования к охлаждаемому воздуху

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура, К	от 299,15 до 308,15
2	Относительная влажность, %	до 100
3	Запыленность, мг/м ³	до 100
4	Барометрическое давление, МПа	от 0,097 до 0,12
5	Скорость движения воздуха в локальной зоне горной выработки, м/с	от 0,2

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ГЛУБОКИХ ШАХТ

2.1 Закономерности таяния льдосоляной смеси при воздействии температуры

Согласно «Правилам безопасности в угольных шахтах» допустимая температура воздуха в угольных шахтах не должна превышать 26⁰С. Однако, несмотря на принимаемые меры по нормализации температуры, она во многих случаях поднимается до 32 – 33 ⁰С, что приводит к перегреванию организма горнорабочего. При возникновении аварийных ситуаций еще больше усложняются условия пребывания людей в этих местах из-за непригодной для дыхания атмосферы и воздействия теплового излучения.

В связи с этим для обеспечения безопасной работы горняков в этих условиях наиболее необходимым является использование средств искусственного охлаждения воздуха. Перспективным и экономически целесообразным способом снижения температуры воздуха в локальных рабочих зонах горных выработок является применение установок охлаждения воздуха имеющих в своем арсенале аккумуляторов холода в виде льдосоляной смеси.

Расчет параметров любой системы охлаждения, в том числе определение количества аккумуляторов холода выполняются в зависимости от времени защитного действия.

Все процессы теплообмена необходимо начинать с рассмотрения процесса таяния льдосоляной смеси. Так как каждую ячейку аккумулятора холода можно представить в виде трубки некоторой длины, то динамику в нем температуры будем описывать уравнением в цилиндрических координатах

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{a}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \theta}{\partial r} \right), \quad (2.1)$$

где θ - температура ЛС, К;

τ – время, с;

x – продольная координата вдоль ячейки аккумулятора холода, м;

r – радиус в поперечном сечении ячейки аккумулятора холода, м;

a – коэффициент температуропроводности внутри ячейки аккумулятора холода, м²/с.

Схема аккумулятора холода изображена на рисунке 2.1.

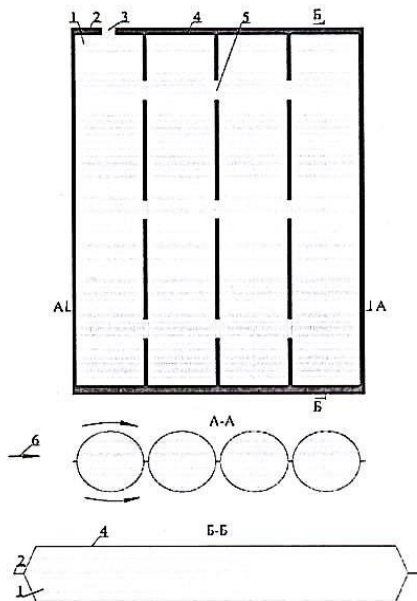


Рисунок 2.1 – Схема аккумулятора холода:
 1 – рассол;
 2 – полиэтиленовый шов;
 3 – заливное отверстие;
 4 – ячейка аккумулятора холода;
 5 – проход для рассола;
 б – направление движения воздуха вдоль аккумулятора холода.

Усредняя по поперечному сечению температуру в ячейке аккумулятора холода, вместо уравнения (2.1), получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \alpha(T_0 - \theta), \quad (2.2)$$

где T_0 – температура за пределами ячейки аккумулятора холода, К;
 a – коэффициент теплообмена льдосоляной смеси с внешней средой, 1/с.

Кроме того, будем считать [18], что изменение массы твердого вещества при таянии льдосоляной смеси пропорционально самой его массе:

$$\frac{dM}{d\tau} = -kM, \quad (2.3)$$

где M – масса льдосоляной смеси, кг/м³;
 k – константа скорости таяния льда, 1/с; τ – время, с.

Интегрируя уравнение (2.3) при начальной массе льдосоляной смеси, равной $M(0) = M_0$, получим

$$M = M_0 \exp[-k\tau]. \quad (2.4)$$

Константу скорости таяния льдосоляной смеси в зависимости от температуры представим соотношением Аррениуса [17]

$$k = A \exp(-E_A / RT), \quad (2.5)$$

где A – пред-экспоненциальный множитель, 1/с;
 E_A – энергия таяния льдосоляной смеси, Дж/моль;
 R – газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(К·моль).
 Подставляя формулу (2.5) в решение (2.4), будем иметь

$$M = M_0 \exp[-A \exp(-E_A / RT) \tau]. \quad (2.6)$$

Такой подход дает возможность выразить зависимость процесса таяния льдосоляной смеси от температуры.

Пред-экспоненциальный множитель A , входящий в формулу (2.5), является заранее неизвестной величиной, но его можно определить, зная период таяния льдосоляной смеси наполовину.

На рисунке 2.2 построена кривая изменения массы льдосоляной смеси от времени с начала его таяния, найденная при константе скорости таяния $k = 4 \cdot 10^{-4}$ 1/с.

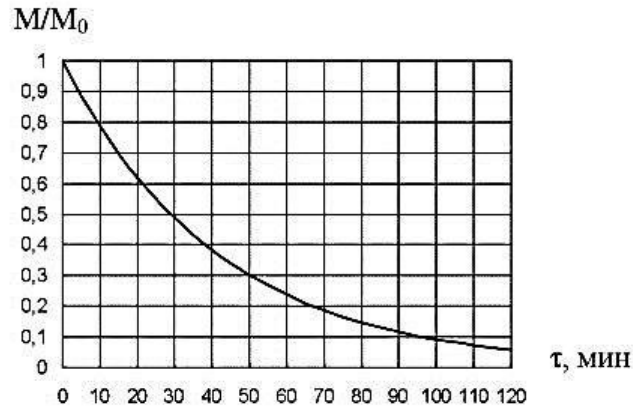


Рисунок 2.2 – Кривая изменения относительной массы льдосоляной смеси при ее таянии

На рисунке 2.3 приведена, найденная по формуле (2.6), зависимость массы льдосоляной смеси от температуры при фиксированном времени его таяния, равном 30 мин. При этом принято $A = 5500$ 1/с; $E_A = 50000$ Дж/моль.

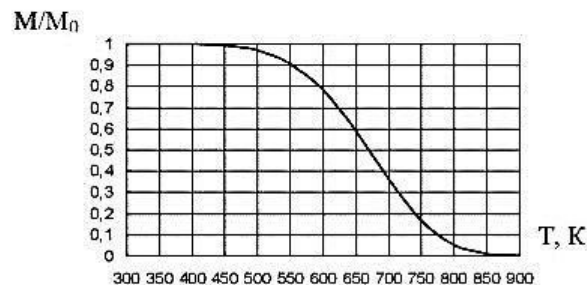


Рисунок 2.3 – Зависимость массы льда от температуры при его таянии.

Как видно (рисунок 2.3), вначале масса льдосоляной смеси при температуре до 300 К постоянна, а затем при возрастании температуре постепенно уменьшается, до превращения в воду.

Полученные результаты позволяют использовать их в установке охлаждения воздуха. Испытания установки охлаждения воздуха производились на базе специализированной лаборатории кафедры «Охрана труда и аэрология» ДОННТУ. Основной целью лабораторных испытаний является проверка работоспособности установки охлаждения воздуха, а также установление ее производительности и определения зоны защитного действия. Эксперименты проводились на экспериментальном образце установки охлаждения воздуха, состоящей из теплоизолированного корпуса, разделенного по вертикали на три отсека, где на полках размещены аккумуляторы холода. Движение воздуха в теплообменных камерах установки охлаждения воздуха обеспечивается вентилятором местного проветривания, соединенного с теплоизолированным корпусом полиэтиленовым рукавом. Охлаждение воздуха происходит за счет омывания аккумуляторов холода, размещенных в теплообменных камерах. Поскольку аккумуляторы холода размещаются на перфорированных полках, их омывание воздухом происходит со всех сторон, что повышает интенсивность теплообмена. Заморозка аккумуляторов холода осуществляется в морозильных камерах. При полной заморозке температура аккумуляторов холода составляет минус 21⁰С. Движение воздуха в лаборатории происходило за счет естественной. В ходе ведения экспериментальных исследований контролировалась температура воздуха на входе в установку охлаждения воздуха, на выходе из нее, на расстоянии трех и шести метров по ходу движения воздушной струи, а также скорость движения воздуха в лаборатории, на выходе из установки охлаждения воздуха.

Большой интерес представляет поведение струи воздуха за пределами установки охлаждения воздуха. Теория струн основана на гипотезе о том, что все элементарные частицы и их фундаментальные взаимодействия возникают в результате колебаний и взаимодействий ультрамикроскопических квантовых струй. Данный подход, с одной стороны, позволяет избежать таких трудностей квантовой теории поля, как перенормировка, а с другой стороны, приводит к более глубокому взгляду на структуру материи и пространства-времени. Развитием теории струн, ожидалось, что в ближайшее время на основе теории струн будет сформулирована так называемая единая теория. Но, несмотря на математическую строгость и целостность теории, пока не найдены варианты экспериментального подтверждения теории струн.

Струя воздуха называется затопленной, если она распространяется в среде с теми же физическими свойствами, что и у нее самой. При изучении движения воздуха в системах вентиляции встречаются различные случаи распространения затопленных струй. Но при рассмотрении этих случаев в качестве исходной используется схема свободной струи. Свободная струя - это струя, распространяющаяся в безграничной среде. (Струя, не ограниченная твердыми стенками, называется свободной). Струя при этом может истекать в неподвижную среду, а так же в поток воздуха.

В данном случае различают:

- струнную струю, струя, истекающая в поток, направление скорости которого совпадает с направлением струи;
- струю в сносящем потоке, если скорость потока направлена под углом к оси струи;
- струю во встречном потоке, когда векторы продольной скорости струи и скорости потока направлены навстречу друг другу.

При изучении поведения струи воздуха, исходящей из установки охлаждения воздуха и попадающей в спутный поток воздуха в горной выработке, необходимо знать дальность ее распространения, площадь покрытия, а также температуру в конце пути.

2.2 Разработка математической модели теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода

Анализ результатов исследований показывает, что теплообменные процессы в охлаждающих элементах рассматриваются в поперечных их сечениях, но не по длине, хотя в ряде случаев это крайне необходимо.

С целью определения производительности установки охлаждения воздуха необходимо разработать математическую модель процессов теплообмена воздушной струи при контакте с аккумулятором холода как по длине, так и в поперечных сечениях.

Функция интенсивности тепловыделения (2.8) должна включаться в уравнение конвективно-диффузионного переноса тепла в условно цилиндрическом канале, которое имеет вид

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + \rho c_p q, \quad (2.7)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

λ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

T – температура, К;

q – интенсивность источника тепловыделения, К/с;

u – продольная скорость воздуха, м/с;

x – продольная, вдоль канала, координата, м;

r – поперечная координата от центра симметрии сечения канала, м.

На рисунке 2.4 приведена схема привязки системы координат к натурному объекту (к установке охлаждения воздуха). На рисунке стрелкой указано направление движения потока воздуха.

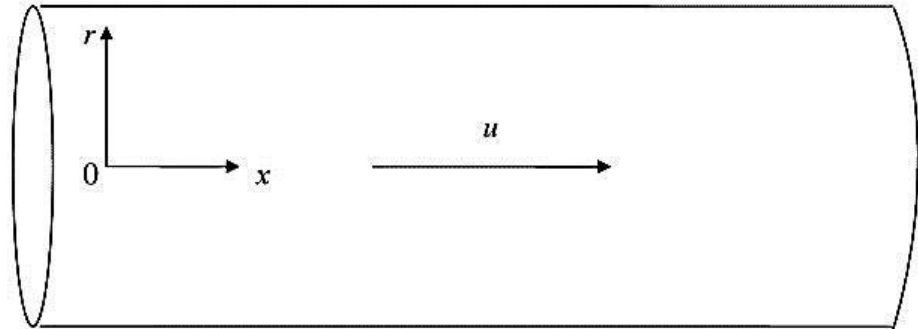


Рисунок 2.4 – Схема привязки системы координат к натурному объекту

Преобразуем уравнение (2.7) к виду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) + q, \quad (2.8)$$

где $a_1 = \lambda_1 / (\rho c_p)$ – коэффициент температуропроводности воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$.

К уравнению (2.8) необходимо добавить уравнение теплопроводности за пределами канала, аналогичное уравнению (2.8), но без конвективного переноса и без источников тепла

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right), \quad (2.9)$$

где θ – температура за пределами канала, К;

a_2 – коэффициент температуропроводности окружающего массива, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для упрощения задачи будем рассматривать среднюю по поперечному сечению канала температуру воздуха. С этой целью проинтегрируем уравнение (2.8) по поперечному сечению канала, полагая

$$\tilde{T}(x, \tau) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R T(2\pi r) dr = \frac{2}{R^2} \int_0^R T r dr, \quad (2.10)$$

где R – радиус канала, м.

Преобразуем уравнение (2.8) к виду

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] + q. \quad (2.11)$$

Рассмотрим вид интеграла

$$\frac{2}{R^2} \int_0^R \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) dr = \frac{2}{R} \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial r}, \quad (2.12)$$

После интегрирования уравнения (2.11) по площади поперечного сечения канала с учетом формулы (2.12) получим

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \left[\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{2}{R} \frac{\partial T(x, R, \tau)}{\partial r} \right] + q, \quad (2.13)$$

На контакте вентиляционного потока со стенками канала задаются обычно граничные условия четвертого рода, указывающие на то, что температура и тепловые источники на контакте канала с внешней средой должны быть равны:

$$1) \tilde{T}(x, R, \tau) = \theta(x, R, \tau); \quad 2) \lambda_1 \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \right|_{r=R} = \lambda_2 \left. \frac{\partial \theta}{\partial r} \right|_{r=R}, \quad (2.14)$$

где λ_1 и λ_2 коэффициенты теплопроводности соответственно в потоке воздуха и за его пределами, Вт/(м·К).

Принимаем, что при $r = R$ градиент температуры на стенке канала пропорционален разности температур:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial \tilde{T}}{\partial r} \right|_{r=R} = \alpha_1 (\theta - T_{cm}), \quad (2.15)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи потока воздуха стенкам канала, Вт/(м²·К);
 T_{cm} – температура стенки, К.

Так как коэффициент температуропроводности равен $a_1 = \lambda_1 / \rho c_p$, то с учетом выражения (2.15) приведем уравнение (2.13) к виду

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \left(\frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + \frac{2\alpha}{\rho c_p R} (\theta - T_{cm}) \right) + q. \quad (2.16)$$

В уравнении (2.9) второе слагаемое в его правой части имеет порядок малости намного меньше, чем третье слагаемое и поэтому вместо (2.9) получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} \right). \quad (2.17)$$

Поскольку прогрев стенок канала происходит на незначительную глубину, то уравнение (2.17) еще больше упрощается и принимает вид

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2}. \quad (2.18)$$

Представим уравнение (2.18) в конечных разностях по радиусу и получим

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_2}{\Delta r^2} (\theta_1 - 2\theta + T_{cm}). \quad (2.19)$$

Примем за пределами канала условие непроницаемости теплового потока: $\theta_1 = 0$, а температуру на стенке равной

$$T_{cm} = (\tilde{T} + \theta) / 2, \quad (2.20)$$

и представим уравнение (2.19) в виде

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{a_2}{2\Delta r^2} (\tilde{T} - \theta). \quad (2.21)$$

Тогда при $q = 0$ упростится и уравнение (2.16) и примет вид

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial \tau} + u \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x^2} + b(\theta - \tilde{T}), \quad (2.22)$$

где коэффициент теплообмена $b = \frac{2\alpha}{\rho c_p R} \cdot 1/c$.

Температура в льдосоляной смеси должна сначала некоторое время оставаться неизменной, а затем начинать увеличиваться после полного таяния льдосоляной смеси. Поэтому примем при таянии льдосоляной смеси

$$\theta = T_1, \text{ если } \tau < \tau_1, \quad (2.23)$$

где T_1 – температура льдосоляной смеси, К;

τ_1 , - время таяния льдосоляной смеси, с.

После таяния льдосоляной смеси в рассоле будут происходить процессы теплообмена с воздухом по закону

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b(T - \theta), \quad (2.24)$$

В начальное время $\tau = 0$ в потоке воздуха везде температура будет равной начальной температуре $T = T_0$.

Рассол после таяния льда, реагируя с потоком воздуха, будет также поглощать тепло.

2.3 Исследование процессов теплообмена воздушной струи при контакте с льдосоляной смесью

При исследовании процессов теплообмена воздушной струи при контакте со льдосоляной смесью используем уравнения (2.22) и (2.24) как систему:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} &= a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b(\theta - T), \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b(T - \theta).\end{aligned}\quad (2.25)$$

Из-за сложности системы уравнений (2.25) будем решать их численным методом, для чего выразим производные в конечных разностях

$$\begin{aligned}\frac{\Delta T}{\Delta \tau} + u \frac{\Delta T}{\Delta x} &= a_1 \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + b(\theta - T), \\ \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} &= a \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta x^2} + b(T - \theta).\end{aligned}\quad (2.26)$$

Раскрывая выражения для приращений температуры вместо (2.26), получим

$$\begin{aligned}\frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta \tau} &= \frac{u}{\Delta x} (T_{m-1,n} - T_{m,n}) + a_1 \left(\frac{T_{m-1,n} - 2T_{m,n} + T_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b(\theta_{m,n} - T_{m,n}); \\ \frac{\theta_{m,n+1} - \theta_{m,n}}{\Delta \tau} &= a \left(\frac{\theta_{m-1,n} - 2\theta_{m,n} + \theta_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b(T_{m,n} - \theta_{m,n}),\end{aligned}\quad (2.27)$$

где m - номер узла сетки при условном разбиении отрезка в направлении по длине установки охлаждения воздуха;

n - номер узла по времени.

На рисунке 2.5 представлено условное разбиение на отрезки.

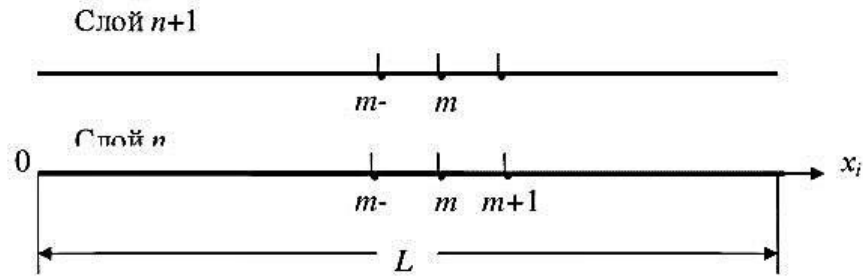


Рисунок 2.5 – Номера узлов по длине установки охлаждения воздуха и по времени

Разрешим уравнения (2.27) относительно искомых величин и получим

$$T_{m,n+1} = T_{m,n} + \frac{u\Delta\tau}{\Delta x}(T_{m-1,n} - T_{m,n}) + a_1\Delta\tau \left(\frac{\bar{T}_{m-1,n} - 2\bar{T}_{m,n} + \bar{T}_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b\Delta\tau(\theta_{m,n} - T_{m,n});$$

$$\theta_{m,n+1} = \theta_{m,n} + a\Delta\tau \left(\frac{\theta_{m-1,n} - 2\theta_{m,n} + \theta_{m+1,n}}{\Delta x^2} \right) + b\Delta\tau(T_{m,n} - \theta_{m,n}), \quad (2.28)$$

Принимая $a_1 = a$, преобразуем систему уравнений (2.28) к более удобному для расчетов виду

$$T_{m,n+1} = \left(\frac{u\Delta\tau}{\Delta x} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \right) T_{m-1,n} + \left(1 - \frac{u\Delta\tau}{\Delta x} - 2\frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} - b\Delta\tau \right) T_{m,n} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} T_{m+1,n} + b\Delta\tau\theta_{m,n},$$

$$\theta_{m,n+1} = \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \theta_{m-1,n} + \left(1 - \frac{2a\Delta\tau}{\Delta x^2} - b\Delta\tau \right) \theta_{m,n} + \frac{a\Delta\tau}{\Delta x^2} \theta_{m+1,n} + b\Delta\tau T_{m,n}. \quad (2.29)$$

Для расчетов могут быть использованы как формулы системы уравнений (2.28), так и формулы (2.29), однако удобство формул (2.29) в том, что они содержат три слагаемых относительно температур слева, в центре и справа.

Приняв скорость газоздушнoй смеси постоянной, представим полученные уравнения (2.29) в критериальном виде

$$T_{m,n+1} = (Cu + Fo)T_{m-1,n} + (1 - Cu - 2Fo - \gamma)T_{m,n} + FoT_{m+1,n} + \gamma\theta_{m,n}$$

$$\theta_{m,n+1} = Fo\theta_{m-1,n} + (1 - 2Fo - \gamma)\theta_{m,n} + Fo\theta_{m+1,n} + \gamma T_{m,n}, \quad (2.30)$$

где $Cu = u\Delta t / \Delta x$ – критерий моделирования Куранта;

$Fo = D_x \Delta t / \Delta x^2$ – диффузионный критерий Фурье;

$\gamma = b\Delta t$ – безразмерный параметр интенсивности теплообмена со стенками канала.

Очевидно, для устойчивого счета по формулам (2.30) необходимо потребовать, чтобы

$$Cu + 2Fo + \gamma < 1.$$

Действительно, если не соблюдать это условие, то температура может принять отрицательные значения, что не соответствует действительности.

Начальными условиями для уравнений системы (2.30) будут условия

$$T_{m,0} = T_0; \theta_{m,0} = T_1, \quad (2.31)$$

где T_0 – температура горячего воздуха до охлаждения, К;

T_1 – температура льдосоляной смеси, К.

Граничными условиями для уравнений (2.30) будут условия

$$\bar{T}_{0,n} = 1; T_{M,n} = T_{M-1,n}, \quad (2.32)$$

где M – номер узла на выходе воздуха из установки охлаждения воздуха.

На рисунке 2.6 приведена схема движения воздуха в установке охлаждения воздуха.

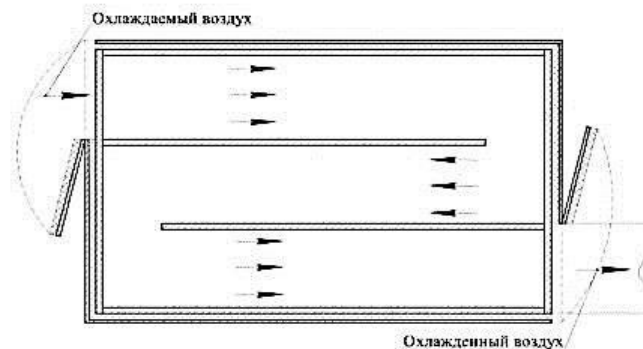


Рисунок 2.6 – Схема движения воздуха в установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки

Здесь при расчетах необходимо принимать на поворотах воздуха коэффициент теплообмена $\gamma = 0$, так как в этих местах будут отсутствовать аккумуляторы холода.

На рисунке 2.7 представлены результаты расчета по первой формуле (2.30) распределения температуры вдоль установки охлаждения воздуха при

заданных коэффициентах для нетающей льдосоляной смеси.

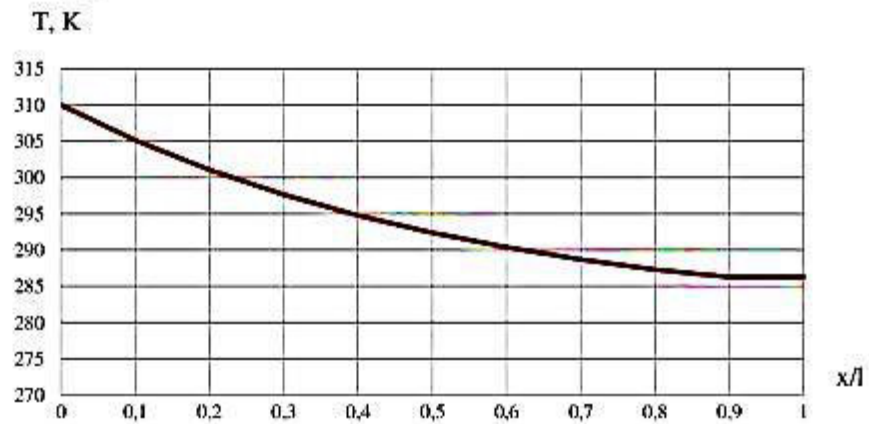


Рисунок.2.7 – Распределение температуры в установке охлаждения воздуха по ее длине через относительное время $\Delta t/t = 30$

Как видно (рисунок 2.7), при коэффициентах первой формулы (2.29), равных

$$Cu = 0,5; Fo = 0,1; \gamma = 0,3, \quad (2.33)$$

после охлаждения нагретый воздух от температуры 305 К (32 °С) постепенно снижается до температуры 293 К (20 °С) на выходе из установки охлаждения воздуха, что позволяет снизить температуру в охлаждаемой зоне до нормативных значений. Таким образом, разработанная математическая модель процесса теплообмена воздушной струи при контакте с льдосоляной смеси дает возможность исследовать процесс охлаждения воздуха в установке охлаждения воздуха.

2.4 Исследование дальности подачи струи охлажденного воздуха в проветриваемую горючую выработку

При истечении из сопла установки охлажденной струи с большой скоростью она попадает в спутный поток нагретого воздуха и постепенно смешивается с ним. Схема их перемешивания изображена на рисунке 2.8.

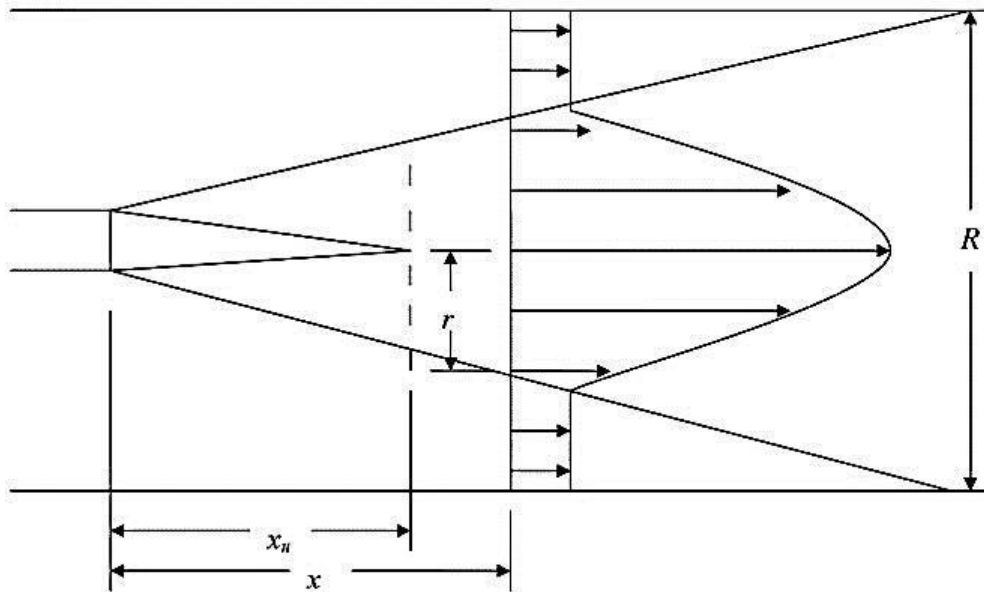


Рисунок 2.8 – Схема течения охлажденного воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха и его перемешивания с нагретым потоком воздуха в горной выработке:

r – радиус струи в зависимости от расстояния до трубопровода; x – расстояние от конца трубы по ходу движения струи; x_n – длина начального участка;
 R – текущий радиус поперечного сечения струи.

Часть струи, как показано на рисунке 2.8, имеет ядро течения с постоянной скоростью от конца сопла до полного разрушения ядра и называется начальным участком x_n .

Размывание струи за пределами начального участка ($x > x_n$) приводит к ее утолщению и падению скорости вдоль оси. Такой участок струи является основным.

Для установления дальности подачи и закономерностей распада струй охлажденного воздуха будем исходить из теории движения газожидкостных систем. На основании общих представлений и известных экспериментальных данных, схему движения и распада воздушной струи можно изобразить в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

Будем считать, что до распада струи можно пренебречь силами гравитации, благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтем, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения холодной струи с нагретым воздухом, но и бокового трения струи о воздух.

Тогда при отсутствии фазовых превращений уравнение нестационарного относительного движения одиночной струи можно представить в виде

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -(\lambda S_6 + \zeta S) \rho_0 \frac{w^2}{2V}, \quad (2.34)$$

где ρ – переменная плотность воздуха, кг/м³;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м³;

w – продольная скорость движения воздушной струи, м/с;

τ – время с момента вылета холодной струи воздуха из установки охлаждения воздуха, с;

λ – коэффициент бокового трения воздушной струи о воздух в выработке, 1;

ζ – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, 1;

S_6 – площадь боковой поверхности воздушной струи, м²;

S – площадь поперечного сечения воздушной струи в головной ее части, м²;

V – объем холодного воздуха на участке действия воздушной струи, м³.

Уравнение (2.34) предназначено для определения изменения скорости движения холодной струи при начальном условии

$$w(0) = w_0, \quad (2.35)$$

где w_0 – начальная скорость истечения воздушной струи из сопла установки охлаждения воздуха, м/с.

Для получения аналитического решения задачи будем считать все параметры, входящие в уравнение (2.34), заранее известными величинами, за исключением искомой функции скорости w .

Так как объем воздушной струи равен $V = \pi L d^2 / 4$, а боковая поверхность струи $S_6 = \pi L d$, то их отношение можно представить как $S_6 / V = 4 / d$. Подставляя эту формулу в уравнение (2.34) и пренебрегая лобовым сопротивлением по сравнению с боковым сопротивлением, вместо (2.34) получим

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -2\lambda \rho_0 \frac{w^2}{d}, \quad (2.36)$$

где d – диаметр воздушной струи, м.

Принимая $\rho = \rho_0$, разделим переменные в уравнении (2.36) и получим

$$\frac{dw}{w^2} = -2\lambda d \tau / d, \quad (2.37)$$

Решение уравнения (2.37) имеет вид

$$\frac{1}{w} = -2\lambda\tau/d + A, \quad (2.38)$$

где $A = 1/w_0$ – константа интегрирования, с/м.

Подставляя значение константы интегрирования в формулу (2.38), получим

$$w = \frac{w_0}{1 + Cw_0\tau/d}, \quad (2.39)$$

где безразмерный коэффициент $C = 2\lambda$.

Анализ полученного решения (2.39) показывает, что скорость движения воздушной струи будет уменьшаться по сравнению с начальным ее значением.

Для определения дальности x продвижения холодной струи воздуха используем зависимость (2.39) и после интегрирования получим

$$x = \int_0^{\tau} w(\tau) d\tau = \frac{d}{C} \ln(1 + Cw_0\tau/d). \quad (2.40)$$

Из анализа полученной зависимости следует, что дальность продвижения холодной струи воздуха в большой степени зависит от ее начальной скорости и от диаметра выходного отверстия сопла установки охлаждения воздуха.

2.5 Исследование деформации и распада головной части охлажденной струи воздуха

При больших скоростях движения воздушной струи возникающая разность давлений в лобовой и кормовой частях струи стремится ее деформировать и сжать. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи с течением времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания воздушной струи, приводящие к ее распаду. Взаимодействие холодного воздуха с окружающим нагретым воздухом на границе их раздела можно описать уравнением вида

$$2\mu \frac{dR}{d\tau} = R \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right], \quad (2.41)$$

где μ – коэффициент турбулентной динамической вязкости холодного воздуха на границе контакта с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

R – текущий радиус поперечного сечения струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения холодной струи, Па·м;

R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны головной части воздушной струи, м.

Из уравнения (2.41) следует, что изменения радиуса поперечного сечения струи происходят в результате аэродинамического сопротивления движению,

которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому динамическому воздействию на струю противостоит сила поверхностного натяжения струи.

Определим главные радиусы кривизны холодной струи воздуха для сильно вытянутого эллипсоида. В этом случае главные радиусы кривизны в направлении движения струи R_1 и поперек ее движению R_2 соответственно определяются по формулам

$$R_1 = \frac{2R^2}{L}; \quad R_2 = \frac{L^2}{4R}, \quad (2.42)$$

где L – длина воздушной струи до распада, м.

Так как объем струи равен $V = \pi R^2 L$, откуда длина струи $L = \frac{V}{\pi R^2}$, то подставляя это выражение в формулы (2.42), получим

$$R_1 = \frac{2\pi R^4}{V}; \quad R_2 = \frac{V^2}{4\pi^2 R^5}. \quad (2.43)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения воздушной струи $S = \pi R^2$, то вместо уравнения (2.41) будем иметь

$$\mu \frac{dS}{dt} = S \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2.5}}{\pi^{0.5} V^2} \right) \right]. \quad (2.44)$$

Анализ полученного уравнения (2.44) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части охлажденной воздушной струи будет тем больше, чем меньше турбулентная вязкость воздуха. При большой вязкости стержень струи при движении почти не изменит своей формы, что соответствует физическим представлениям. В то же время при малой вязкости воздуха форма струи будет сильно меняться, и в установившемся режиме каждой скорости будет соответствовать своя форма струи. Предположим, что до распада воздушной струи ее длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($R_1 \gg R_2$). Тогда уравнение (2.44) можно упростить и представить в виде

$$\mu \frac{dS}{dt} = S \left[\lambda \rho \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (2.45)$$

Этому уравнению эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{d\tau} = A(\tau)S - B, \quad (2.46)$$

коэффициенты которого равны

$$A(\tau) = \zeta \rho \frac{w^2}{2\mu}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu}. \quad (2.47)$$

Общее решение уравнения (2.46) с начальным условием $S(0) = S_0$ представим в виде

$$S = \exp\left(\int A(\tau) d\tau\right) \left[S_0 - B \int_0^\tau \exp\left(-\int A(\tau) d\tau\right) d\tau \right]. \quad (2.48)$$

В первом приближении, полагая

$$A(0) = A_0 = \zeta \rho \frac{w_0^2}{2\mu}, \quad (2.49)$$

вместо решения (2.48) получим

$$S(\tau) = \exp(A_0 \tau) \left\{ S_0 - \frac{B}{A_0} [1 - \exp(-A_0 \tau)] \right\}. \quad (2.50)$$

Можно образовать безразмерный критериальный комплекс для моделирования динамики воздушной струи. Так, можно принять

$$E_1 = \frac{B}{A_0 S_0}. \quad (2.51)$$

С помощью (2.51) упростим вид уравнения (2.50) и придадим ему вид

$$\bar{S} = \frac{S(\tau)}{S_0} = E_1 + (1 - E_1) \exp(A_0 \tau). \quad (2.52)$$

При полной деформации воздушной струи и больших ее колебаниях происходит окончательный ее распад. Будем считать, что распад воздушной струи происходит тогда, когда площадь ее поперечного сечения достигает максимально возможного значения. Это значение можно вычислить, полагая радиус боковой кривизны намного меньше радиуса фронтальной кривизны ($R_2 \ll R_1$). Тогда при равновесии сил кинетической энергии струи и сил поверхностного натяжения из уравнения (2.45) получим

$$\lambda \rho \frac{w_0^2}{2} = \sigma \frac{4S_m^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2}, \quad (2.53)$$

откуда найдем максимально возможную площадь $S_1 = S_m$ поперечного сечения воздушной струи

$$S_1 = \left[\pi^{0,5} \lambda \rho \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0,4}. \quad (2.54)$$

Этой площади должно соответствовать определенное время распада воздушной струи и ее скорость. Так, из выражения (2.40) найдем время распада охлажденной струи воздуха τ_m , по формуле

$$\tau_m = \frac{1}{A_0} \ln \left(\frac{S_1 - B/A_0}{S_0 - B/A_0} \right), \quad (2.55)$$

и критическую скорость распада w_1 , м/с, по формуле

$$w_1 = \frac{w_0}{1 + C w_0 \tau_m / d}. \quad (2.56)$$

Для расчета дальности продвижения сплошной части струи холодного воздуха используем формулу (2.40) и получим

$$x_m = \frac{d}{C} \ln(1 + C w_0 \tau_m / d). \quad (2.57)$$

Таким образом, можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи воздуха, а также дальность ее подачи.

Для описания профилей скорости воздуха в струйном турбулентном потоке воспользуемся данными, полученными ранее и подтвержденными экспериментально. Так, установлено, что длина начального участка равняется примерно десяти радиусам на выходе из сопла установки охлаждения воздуха. Поэтому практический интерес представляет основной участок струи.

На основном участке профиль скорости струи может быть описан зависимостью вида [23]

$$w = w_1 + (w_m - w_0) [1 - (y/r)^2]^{3/2}, \quad (2.58)$$

где w_0 – скорость воздуха в горной выработке, м/с;
 w_1 – скорость истечения струи из сопла, м/с;
 w_m – скорость на оси воздушной струи, м/с;

y – расстояние от оси струи перпендикулярно потоку, м;

r – радиус струи в зависимости от расстояния до трубопровода, м.

Установлено [23], что в поперечных сечениях основного участка струи справедлива зависимость избыточной температуры от избыточной скорости

$$\frac{T-T_1}{T_m-T_1} = \left(\frac{w-w_0}{w_m-w_0} \right)^{0,8}, \quad (2.59)$$

где T – температура воздуха на расстоянии r от струи охлажденного воздуха, К;

T_1 – температура в нагретом спутном воздушном потоке, К;

T_m – температура на оси струи, К.

Радиус на основном участке осесимметричной струи или ее полутолщина является линейной функцией от расстояния до начального участка [34]

$$r = 2,73r_0 + \frac{w_1 - w_0}{w_1 + w_0} k(x - x_n), \quad (2.60)$$

где r_0 – радиус выхода сопла установки охлаждения воздуха, м;

k – эмпирическая константа (для основного участка $k = 0,22$);

x_n – длина начального участка, м;

x – расстояние от конца трубы по ходу движения струи, м.

Если скорость на оси струи на начальном участке постоянна, то на основном участке она меняется обратно пропорционально радиусу струи

$$w_m = 2,73w_1 \frac{r_0}{r}. \quad (2.61)$$

Подставляя в формулу (2.61) выражение (2.60), получим

$$w_m = \frac{2,73w_0}{2,73 + \frac{w_0 - w_1}{w_0 + w_1} k(x/r_0 - 10)}. \quad (2.62)$$

В соответствии с экспериментальными данными принято $x \geq x_n = 10r_0$.

Таким образом, общая схема расчета такова. Задавшись расстоянием до места соприкосновения струи охлажденного воздуха со стенками канала, определяем по формуле (2.62) скорость на оси струи при известной скорости основного потока воздуха и скорости истечения струи охлажденного воздуха, а также при $k = 0,22$ и заданном радиусе сопла.

Далее холодная струя охлажденного воздуха, полностью смешавшись со спутным нагретым потоком воздуха, переносится дальше. При этом, благодаря турбулентному режиму движения воздуха и хаотической пульсации скорости

во всех направлениях происходит перемешивание нагретой воздушной струи с охлажденным воздухом.

При больших скоростях движения струи охлажденного воздуха возникающая разность давлений в лобовой и кормовой частях струи стремится ее деформировать и сжать. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи охлажденного воздуха с течением времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания воздушного потока, приводящие к его распаду. Взаимодействие струи охлажденного воздуха с окружающим нагретым воздухом на границе их раздела можно описать уравнением вида

$$2\mu \frac{dr}{d\tau} = r \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \right], \quad (2.63)$$

где μ – коэффициент турбулентной динамической вязкости холодной струи на границе контакта с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

r – текущий радиус поперечного сечения струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения струи, Па·м;

r_1 и r_2 – главные радиусы кривизны головной части струи, м.

Из уравнения (2.63) следует, что изменения радиуса поперечного сечения струи охлажденного воздуха происходят в результате аэродинамического сопротивления движению, которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому динамическому воздействию на струю противостоит сила ее поверхностного натяжения.

Определим главные радиусы кривизны струи холодного воздуха для сильно вытянутого эллипсоида. В этом случае главные радиусы кривизны в направлении движения струи охлажденного воздуха r_1 и поперек ее движению r_2 определяются соответственно по формулам

$$r_1 = \frac{2r^2}{l}; \quad r_2 = \frac{l^2}{4r}. \quad (2.64)$$

Подставляя в формулы (2.64) выражение для длины струи $l = \frac{V}{\pi r^2}$, получим

$$r_1 = \frac{2\pi r^4}{V}; \quad r_2 = \frac{V^2}{4\pi^2 r^5}. \quad (2.65)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения струи $S = \pi r^2$, то вместо уравнения (2.63) будем иметь

$$44\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \sigma \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2,5}}{\pi^{0,5}V^2} \right) \right]. \quad (2.66)$$

Анализ полученного уравнения (2.66) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части струи будет тем больше, чем меньше турбулентная вязкость воздуха. При большой вязкости стержень струи при полете почти не изменит своей формы. В то же время при малой вязкости струи воздуха форма струи будет сильно меняться и каждой скорости, в установившемся режиме, будет соответствовать своя форма струи. Предположим, что до распада струи ее длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($r_1 \gg r_2$). Тогда уравнение (2.66) можно упростить и представить в виде

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (2.67)$$

Этому уравнению эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{d\tau} = A(\tau)S - B, \quad (2.68)$$

коэффициенты которого равны

$$A(\tau) = \zeta \rho \frac{w^2}{2\mu}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu}.$$

Общее решение уравнения (2.68) с начальным условием $S(0) = S_0$ представим в виде

$$S = \exp \left(\int A(\tau) d\tau \right) \left[S_0 - B \int_0^\tau \exp(-A(\tau) d\tau) d\tau \right]. \quad (2.69)$$

В первом приближении, полагая

$$A(0) = A_0 = \zeta \rho \frac{w_0^2}{2\mu},$$

вместо решения (2.69) получим

$$S(\tau) = \exp(A_0\tau) \left\{ S_0 - \frac{B}{A_0} [1 - \exp(-A_0\tau)] \right\}. \quad (2.70)$$

Можно образовать безразмерный критериальный комплекс для моделирования динамики струи. Так, можно принять

$$E_1 = \frac{B}{A_0 S_0}. \quad (2.71)$$

С помощью (2.71) упростим уравнение (2.70) и придадим ему вид

$$\frac{S(\tau)}{S_0} = E_1 + (1 - E_1) \exp(A_0\tau). \quad (2.72)$$

На рисунке 2.9 по данным расчета по формуле (2.72) для произвольно выбранного значения $E_1 = 0,9$ определена форма головной части струи.

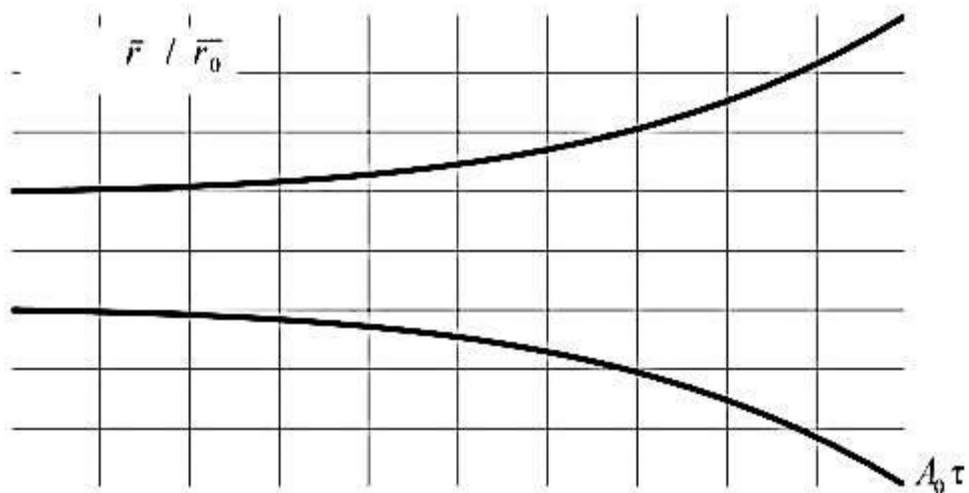


Рисунок 2.9 – Характер изменения формы головной части струи холодного воздуха

Из рисунка 2.9 видно, что в начале подачи струя почти не деформируется, а затем головная ее часть существенно расширяется.

При полной деформации струи и больших ее вибрациях происходит окончательный ее распад. Будем считать, что распад струи происходит тогда, когда площадь ее поперечного сечения достигает максимально возможного значения. Это значение можно вычислить, полагая радиус боковой кривизны намного меньше радиуса фронтальной кривизны ($r_2 \ll r_1$). Тогда при равновесии сил кинетической энергии струи и сил поверхностного натяжения

из уравнения (2.53) получим

$$\lambda \rho \frac{w_0^2}{2} = \sigma \frac{4S_m^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2}, \quad (2.73)$$

откуда найдем максимально возможную площадь поперечного сечения струи

$$S_m = \left[\pi^{0,5} \lambda \rho \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0,4}. \quad (2.74)$$

Для определения максимальной площади поперечного сечения струи формулу (2.74) преобразуем к виду

$$S_m = (a w_0 V)^{0,8}, \quad (2.75)$$

где a – эмпирическая константа, $\text{с/м}^{1,5}$.

Так как объем струи охлажденного воздуха равняется $V = S_0 l$, а скорость ее истечения, выраженная через расход, $w_0 = G / (\rho S_0)$, то вместо формулы (2.75) получим

$$S_m = \left(\frac{a G l}{\rho} \right)^{0,8}, \quad (2.76)$$

где ρ – плотность охлажденного воздуха, кг/м^3 .

При сплошной струе для определения ее расхода на один квадратный метр может использоваться формула

$$\tilde{G} = \frac{G}{S_m}, \quad (2.77)$$

где \tilde{G} – расход струи охлажденного воздуха на один квадратный метр, $\text{кг/(с}\cdot\text{м}^2)$.

При распыленной струе для определения ее расхода на один квадратный метр может использоваться формула

$$\tilde{G}_p = \frac{G}{\pi \left[x \cdot \tan \left(\frac{\pi \alpha}{360} \right) \right]^2}, \quad (2.78)$$

где \tilde{G}_p – расход распыленной струи на один квадратный метр, кг/(с·м²);

x – расстояние от сопла установки охлаждения воздуха, м.

Максимальной площади поперечного сечения струи должно соответствовать определенное время распада струи и ее скорость. Так, из выражения (2.48) найдем время распада струи t_m , с:

$$\tau_m = \frac{1}{A_0} \ln \frac{S_m - B/A_0}{S_0 - B/A_0}, \quad (2.79)$$

а согласно (2.49) – критическую скорость распада w_1 , м/с

$$w_1 = \frac{w_0}{1 + Cw_0 t_m / d}. \quad (2.80)$$

Для расчета дальности подачи сплошной части струи охлажденного воздуха, используем формулу (2.46) и получим

$$x_m = \frac{d}{C} \ln \left(1 + \frac{Cw_0 t_m}{d} \right). \quad (2.81)$$

где C – эмпирическая константа, 1.

При отсутствии данных о начальной скорости движения струи ее можно установить по данным о перепаде давлений на выходе из установки охлаждения воздуха ΔP , Па.

Расход струи охлажденного воздуха на выходе из установки охлаждения воздуха G , кг/с, подчиняется параболической зависимости

$$G = B\varphi F \sqrt{\rho_1 \Delta P}, \quad (2.82)$$

где B – коэффициент истечения ($B \approx 4$), 1;

φ – коэффициент скорости, близкий к единице, 1;

ΔP – перепад давлений на выходе из сопла установки охлаждения воздуха, Па.

Так как расход струи охлажденного воздуха $G = \rho_1 w_0 F$, то вместо формулы (2.58) получим

$$w_0 = B\varphi \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_1}}, \quad (2.83)$$

Подставляя зависимость (2.59) в (2.57), можно при $\tau = \tau_m$ определять дальность подачи сплошной части струи по формуле

$$x_m = \frac{d}{C} \ln \left(1 + CB\varphi \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_1}} \tau_m / d \right). \quad (2.84)$$

Таким образом, с достаточной степенью точности можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи охлажденного воздуха, а также дальность ее подачи, исходя из теории движения газожидкостных систем.

Схема движения и распада сплошной струи, которую можно изобразить в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

Как установлено, до распада струи можно пренебречь силами гравитации, благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтено, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения с воздухом, но и бокового трения струи охлажденного воздуха о нагретый воздух спутного потока.

Определена форма головной части струи, меняющаяся во время движения струи охлажденного воздуха. Так, в начале движения струя почти не деформируется, а затем головная ее часть может существенно расшириться, как бы вбирая в себя свою кормовую часть.

Таким образом, выполнены исследования динамики струй охлажденного воздуха и закономерностей их распада.

За пределами установки охлаждения воздуха в потоке воздуха горной выработки может быть использовано уравнение теплообмена (2.22) в стационарном виде и без учета диффузионных процессов

$$u \frac{dT}{dx} = b(T_0 - T), \quad (2.85)$$

где T – температура за установкой охлаждения воздуха (после установки охлаждения воздуха), К;

T_0 – температура в горной выработке (перед установкой охлаждения воздуха), К;

$u = u(x)$ – скорость воздуха за установкой охлаждения воздуха, м/с;

b – коэффициент теплообмена воздуха со стенками выработки, 1/с;

x – расстояние от установки охлаждения воздуха по ходу движения струи охлажденного воздуха, м.

Начальное условие для уравнения (2.85) представим в виде

$$T(0) = T_1, \quad (2.86)$$

где T_1 – температура на выходе из установки охлаждения воздуха, К.

Интегрируя уравнение (2.85) в общем виде, получим

$$\ln(T - T_0) = -b \int_0^x (1/u) dx, \quad (2.87)$$

откуда найдем формулу для расчета температуры на различных расстояниях от установки охлаждения воздуха

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-b \int_0^x (1/u) dx\right). \quad (2.88)$$

При постоянной скорости за УОВ ($u = \text{const}$) формула (2.88) примет вид

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \exp\left(-\frac{b}{u} x\right). \quad (2.89)$$

Полученная формула (2.89) позволяет определять, как меняется температура воздуха при удалении от установки.

3. ЗАКОНОМЕРНОСТИ ДВИЖЕНИЯ СТРУИ ОХЛАЖДЕННОГО ВОЗДУХА В ГОРНОЙ ВЫРАБОТКЕ

При струйном истечении охлажденной струи из сопла с большой скоростью она попадает в спутный поток нагретого воздуха и постепенно смешивается с ним. Часть струи имеет ядро течения с постоянной скоростью от конца трубы до полного разрушения ядра и называется начальным участком x_n .

Размывание струи за пределами начального участка ($x > x_n$) приводит к ее утолщению и падению скорости вдоль оси. Такой участок струи является основным.

Для установления дальности подачи и закономерностей распада струи охлажденного воздуха будем исходить из теории движения газожидкостных систем. На основании общих представлений и известных экспериментальных данных, схему движения и распада струи можно изобразить в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

Будем считать, что до распада струи можно пренебречь силами гравитации, благодаря высокой скорости ее движения. Вместе с тем учтем, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счет лобового столкновения холодной струи с нагретым воздухом, но и бокового трения струи о нагретый воздух.

Тогда при отсутствии фазовых превращений уравнение нестационарного относительного движения одиночной струи можно представить в виде

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -(\lambda S_6 + \zeta S) \rho_0 \frac{w^2}{2V}, \quad (3.1)$$

Где ρ – переменная плотность воздуха, кг/м^3 ;

ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 ;

w – продольная скорость движения струи, м/с ;

τ – время с момента вылета холодной струи из установки охлаждения воздуха, с;

λ – коэффициент бокового трения струи о воздух, 1;

ζ – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления, 1;

S_6 – площадь боковой поверхности струи, м^2 ;

S – площадь поперечного сечения струи в головной ее части, м^2 ;

V – объем холодного воздуха на участке действия струи, м^3 .

Уравнение (1) предназначено для определения скорости изменения подачи холодной струи при начальном условии

$$w(0) = w_0, \quad (3.2)$$

где w_0 – начальная скорость истечения струи, м/с .

Для получения аналитического решения задачи будем считать все

параметры, входящие в уравнение (3.1), заранее известными величинами, за исключением искомой функции скорости w .

Так как объем струи равен $V = \pi L d^2 / 4$, а боковая поверхность струи $S_g = \pi L d$, то их отношение можно представить как $S_g / V = 4 / d$. Подставляя эту формулу в уравнение (3.1) и пренебрегая лобовым сопротивлением по сравнению с боковым сопротивлением, вместо (3.1) получим

$$\rho \frac{dw}{d\tau} = -2\lambda \rho_0 \frac{w^2}{d}, \quad (3.3)$$

где d – диаметр струи, м.

Принимая $\rho = \rho_0$, разделим переменные в уравнении (3.3) и получим

$$\frac{dw}{w^2} = -2\lambda d\tau / d, \quad (3.4)$$

Решение уравнения (4) имеет вид

$$\frac{1}{w} = -2\lambda\tau / d + A, \quad (3.5)$$

где $A = 1/w_0$ – константа интегрирования, с/м.

Подставляя значение константы интегрирования в формулу (3.5), получим

$$w = \frac{w_0}{1 + C w_0 \tau / d}, \quad (3.6)$$

где безразмерный коэффициент $C = 2\lambda$.

Анализ полученного решения (3.6) показывает, что скорость движения струи будет уменьшаться по сравнению с начальным ее значением.

Для определения дальности x продвижения холодной струи воздуха используем зависимость (3.6) и после интегрирования получим

$$x = \int_0^{\tau} w(\tau) d\tau = \frac{d}{C} \ln(1 + C w_0 \tau / d), \quad (3.7)$$

Из анализа полученной зависимости следует, что дальность продвижения холодной струи воздуха в большой степени зависит от ее начальной скорости и от диаметра выходного отверстия установки охлаждения воздуха.

При больших скоростях движения струи возникающая разность давлений в лобовой и кормовой частях струи стремится ее деформировать и сжать. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи с течением

времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания струи, приводящие к ее распаду. Взаимодействие холодного воздуха с окружающим нагретым воздухом на границе их раздела можно описать уравнением вида

$$2\mu \frac{dR}{d\tau} = R \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \right], \quad (3.8)$$

где μ – коэффициент турбулентной динамической вязкости холодного воздуха на границе контакта с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

R – текущий радиус поперечного сечения струи, м;

σ – коэффициент поверхностного натяжения холодной струи, Па·м;

R_1 и R_2 – главные радиусы кривизны головной части струи, м.

Из уравнения (3.8) следует, что изменения площади или радиуса поперечного сечения струи происходят в результате аэродинамического сопротивления движению, которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому динамическому воздействию на струю противостоит сила поверхностного натяжения струи.

Определим главные радиусы кривизны холодной струи воздуха для сильно вытянутого эллипсоида. В этом случае главные радиусы кривизны в направлении движения струи R_1 и поперек ее движения R_2 соответственно определяются по формулам

$$R_1 = \frac{2R^2}{L}; \quad R_2 = \frac{L^2}{4R}, \quad (3.9)$$

где L – длина струи до распада, м.

Так как объем струи равен $V = \pi R^2 L$, откуда длина струи $L = \frac{V}{\pi R^2}$, то подставляя это выражение в формулы (3.9), получим

$$R_1 = \frac{2\pi R^4}{V}; \quad R_2 = \frac{V^2}{4\pi^2 R^5}. \quad (3.10)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения струи $S = \pi R^2$, то вместо уравнения (3.9) будем иметь

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho_2 \frac{w^2}{2} - \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2} \right) \right]. \quad (3.11)$$

Анализ полученного уравнения (3.11) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части струи будет тем больше, чем

меньше турбулентная вязкость воздуха. При большой вязкости стержень струи при полете почти не изменит своей формы. В то же время при малой вязкости воздуха форма струи будет сильно меняться, и в установившемся режиме каждой скорости будет соответствовать своя форма струи. Предположим, что до распада струи ее длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($R_1 \gg R_2$). Тогда уравнение (3.11) можно упростить и представить в виде

$$\mu \frac{dS}{d\tau} = S \left[\lambda \rho \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (3.12)$$

Этому уравнению эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{d\tau} = A(\tau)S - B, \quad (3.13)$$

коэффициенты которого равны

$$A(\tau) = \zeta \rho \frac{w^2}{2\mu}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu}. \quad (3.14)$$

Полагая $A(0) = A_0 = \zeta \rho \frac{w_0^2}{2\mu}$ решение уравнения (3.13) представим в виде

$$S(\tau) = \exp(A_0\tau) \left\{ S_0 - \frac{B}{A_0} [1 - \exp(-A_0\tau)] \right\}, \quad (3.15)$$

При полной деформации струи и больших ее вибрациях происходит окончательный ее распад. Будем считать, что распад струи происходит тогда, когда площадь ее поперечного сечения достигает максимально возможного значения. Это значение можно вычислить, полагая радиус боковой кривизны намного меньше радиуса фронтальной кривизны ($R_2 \ll R_1$). Тогда при равновесии сил кинетической энергии струи и сил поверхностного натяжения из уравнения (3.12) получим:

$$\lambda \rho \frac{w_0^2}{2} = \sigma \frac{4S_m^{2.5}}{\pi^{0.5} V^2}, \quad (3.16)$$

откуда найдем максимально возможную площадь $S_1 = S_m$ поперечного сечения струи

$$S_1 = \left[\pi^{0.5} \lambda \rho \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0.4}. \quad (3.17)$$

Этой площади должно соответствовать определенное время распада струи и ее скорость. Так, из выражения (3.16) найдем время распада струи τ_m , по формуле:

$$\tau_m = \frac{1}{A_0} \ln \left(\frac{S_1 - B/A_0}{S_0 - B/A_0} \right), \quad (3.18)$$

и критическую скорость распада w_1 , м/с, по формуле

$$w_1 = \frac{w_0}{1 + C w_0 \tau_m / d}. \quad (3.19)$$

где C – эмпирическая константа.

Для расчета дальности подачи сплошной части струи холодного воздуха используем формулу (3.19) и получим

$$x_m = \frac{d}{C} \ln(1 + C w_0 \tau_m / d). \quad (3.20)$$

Таким образом, расчетным путем можно определять максимально возможную площадь поперечного сечения струи воздуха, а также дальность подачи сплошной и распыленной струи.

Анализ зависимости (3.19) избыточной температуры от избыточной скорости показывает, что она не только не отражает физической сущности процессов теплообмена, но имеет большие погрешности при расчетах.

Поэтому рассмотрим стационарный процесс теплообмена в горной выработке без учета термодиффузии:

$$w \frac{dT}{dx} = b(T_1 - T). \quad (3.21)$$

где T_1 – температура в горной выработке, К.

Подставляя в уравнение (3.21) формулу для расчета скорости струи воздуха (3.20), получим

$$\frac{dT}{dx} = \frac{1 + Cx/d}{w_0} b(T_1 - T). \quad (3.22)$$

В данном случае за расстояние принято $x = w_0 \tau$.
После интегрирования уравнения (3.22) получим

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp\left(-\frac{x + Cx^2 / 2d}{w_0} b\right), \quad (3.23)$$

где T_0 - температура на выходе из установки охлаждения воздуха, К.

Анализ полученного решения (3.23) показывает, что при $x = 0$ температура на выходе из установки охлаждения воздуха равна $T = T_0$, а вдали от нее она приближается к температуре в горной выработке и тем быстрее, чем больше параметр b .

Таким образом, общая схема расчета такова. Задавшись исходными данными, определяем по формуле (3.20), как основной параметр, дальность подачи сплошной части струи холодного воздуха.

В подготовке рекомендаций принимали участие: Булгаков Ю.Ф., Кавера А.Л., Курбацкий Е.В., Подвигин К.А.



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
 Ученый секретарь
 диссертационного совета Д 01.008.01
 И.А. Бершадский

Приложение 3
Копия патента на полезную модель
РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ
№ 207609

**Устройство для охлаждения воздуха в локальной
рабочей зоне подземной выработки**

Патентообладатель: *Подвигин Константин Александрович (UA)*

Автор(ы): *Подвигин Константин Александрович (UA)*

Заявка № 2021123337
Приоритет полезной модели 02 августа 2021 г.
Дата государственной регистрации
в Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации 03 ноября 2021 г.
Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает 02 августа 2031 г.

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат Федеральной службы по интеллектуальной собственности
Владельцу: *Мельник Григорий Петрович*
Действителен с 15.01.2021 по 15.01.2026

Г.П. Подвигин



СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01
И.А. Бершадский

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) RU (11)

207 609⁽¹³⁾ U1(51) МПК
E21F 3/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**(52) СПК
E21F 3/00 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021123337, 02.08.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.08.2021Дата регистрации:
03.11.2021Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 02.08.2021

(45) Опубликовано: 03.11.2021 Бюл. № 31

Адрес для переписки:
141143, Московская обл., Щелковский р-н, пос.
Новый Городок, 1, кв. 48, Горопяновой Н.И.(72) Автор(ы):
Подвигин Константин Александрович (UA)(73) Патентообладатель(и):
Подвигин Константин Александрович (UA)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: "Вестник академии гражданской
защиты", научный журнал. - Донецк:
ГОУВПО "Академия гражданской защиты"
МЧС ДНР, выпуск 4 (24), стр. 56-61, 2020 г.
SU 977820 A1, 30.11.1982. SU 1134733 A2,
15.01.1985. RU 2247902 C2, 10.03.2005. RU
2661363 C1, 16.07.2018. RU 2411418 C1,
10.02.2011. DE 4420622 A1, 14.12.1995.

(54) Устройство для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной выработки

(57) Формула полезной модели

Устройство для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки, содержащее теплоизолированный корпус в виде параллелепипеда с выполненными в противоположных боковых стенках входным и выходным люками для прохода воздуха, внутренний объем которого разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам корпуса перегородками с проемами на теплообменные камеры, в каждой из которых параллельно перегородкам расположены выдвижные перфорированные полки с размещенными на них аккумуляторами холода, выполненными в виде капсул из термопластичного полимера с размещенным в них льдом, отличающееся тем, что капсула выполнена с поперечными пережимами вдоль ее продольной оси, образующими ячейки в виде вытянутого эллипсоида вращения, а в качестве льда размещен водосоляной лед, при этом в теплообменной камере со стороны выходного люка установлено взаимосвязанное с ним сопло Лавала.

RU 207609 U1

RU 207609 U1

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) RU (11)

207 609⁽¹³⁾ U1

(51) МПК
E21F 3/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
E21F 3/00 (2021.08)

(21)(22) Заявка: 2021123337, 02.08.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
02.08.2021

Дата регистрации:
03.11.2021

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 02.08.2021

(45) Опубликовано: 03.11.2021 Бюл. № 31

Адрес для переписки:
141143, Московская обл., Щелковский р-н, пос.
Новый Городок, 1, кв. 48, Горопяновой Н.И.

(72) Автор(ы):
Подвигин Константин Александрович (UA)

(73) Патентообладатель(и):
Подвигин Константин Александрович (UA)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: "Вестник академии гражданской
защиты", научный журнал. - Донецк:
ГОУВПО "Академия гражданской защиты"
МЧС ДНР, выпуск 4 (24), стр. 56-61, 2020 г.
SU 977820 A1, 30.11.1982. SU 1134733 A2,
15.01.1985. RU 2247902 C2, 10.03.2005. RU
2661363 C1, 16.07.2018. RU 2411418 C1,
10.02.2011. DE 4420622 A1, 14.12.1995.

(54) Устройство для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной выработки

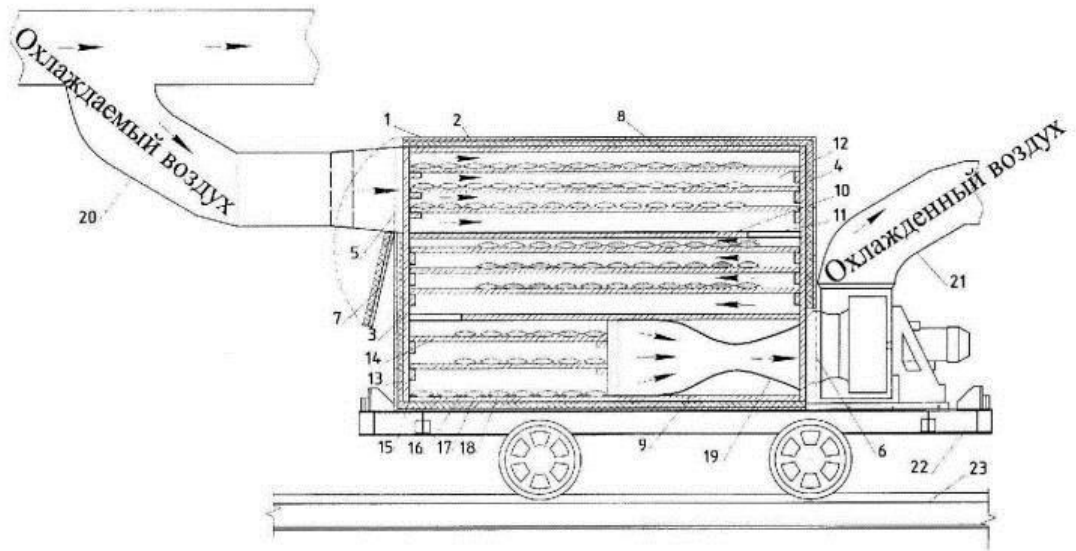
(57) Реферат:

Полезная модель относится к горной промышленности и может быть использована для нормализации микроклимата по тепловому фактору в локальных рабочих зонах при выполнении горноспасательных и аварийно-восстановительных работ, а также в местах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов для очистных забоев и подготовительных выработок. Устройство для охлаждения воздуха содержит теплоизолированный корпус в виде параллелепипеда с выполненными в противоположных боковых стенках входным и выходным люками для прохода воздуха, внутренний объем которого разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам корпуса перегородками с проемами на теплообменные камеры, в каждой из которых

параллельно перегородкам расположены выдвижные перфорированные полки с размещенными на них капсулами из термопластичного полимера с поперечными пережимами, образующими ячейки в виде вытянутого эллипсоида вращения с размещенным в них водосоляным льдом, при этом в теплообменной камере со стороны выходного люка установлено взаимосвязанное с ним сопло Лаваля. Использование полезной модели обеспечивает интенсификацию охлаждения потока воздуха при его прохождении через внутренний объем устройства, что приводит к устойчивой нормализации микроклимата по тепловому фактору в локальной рабочей зоне горной выработки большого объема в течение длительного времени, 2 ил.

RU 207609 U1

RU 207609 U1



Фиг. 1

RU 207609 U1

RU 207609 U1

Полезная модель относится к горной промышленности, а именно к устройствам для охлаждения воздуха, и может быть использована для нормализации микроклимата по тепловому фактору в локальных рабочих зонах горных выработок при выполнении горноспасательных и аварийно-восстановительных работ, а также в местах
5 расположения высокоэнергетических силовых агрегатов для очистных забоев и подготовительных выработок, создающих значительные техногенные тепловые потоки, нагревающие воздух в стесненном рабочем пространстве.

Известен шахтный воздухоохладитель, включающий теплоизолированную емкость, расположенный внутри нее теплообменник с входным и выходным коллекторами,
10 концы которого развальцованы в стенках теплоизолированной емкости, эжектор, всасывающий канал которого сообщен с выходным коллектором теплообменника, газоотводящий трубопровод и баллоны высокого давления, наполненные сжиженной углекислотой и соединенные с внутренней полостью теплоизолированной емкости посредством газоотводящего трубопровода с гидравлическим замком (SU, А.С.
15 №1717844 А1, МПК E21F 3/00 (2006.01), опубл. 07.03.1992 г.).

В известном устройстве поступающий в теплообменники воздух, обладающий низкой теплопроводностью, имеет ламинарное движение, что приводит к его неравномерному охлаждению, поскольку преимущественно охлаждение происходит только внешних слоев. При этом во внутреннем объеме емкости при испарении углекислоты,
20 сублимированная часть льда частично оседает на поверхности теплообменников, а значительная его часть - на внутренней поверхности емкости, что приводит к неравномерному теплообмену, не обеспечивая интенсивного охлаждения. Кроме того, эксплуатация известного устройства сопряжена с выбросом в атмосферу углекислого газа с созданием парникового эффекта, сопровождающегося повышением температуры
25 и снижением содержания кислорода. В результате не обеспечивается нормализация микроклимата по тепловому фактору в локальной рабочей зоне горной выработки большого объема в течение длительного времени.

Наиболее близким аналогом предлагаемой полезной модели является устройство для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки,
30 содержащее теплоизолированный корпус в виде параллелепипеда с выполненными в двух противоположных боковых стенках входным и выходным люками для прохода воздуха, при этом внутренний объем корпуса разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней его стенкам воздухонепроницаемыми перегородками с проемами на нечетное количество теплообменник камер, в каждой из которых
35 параллельно перегородкам расположены на направляющих выдвижные перфорированные полки с размещенными на них аккумуляторами холода в виде капсул из термопластичного полимера, например полиэтилена, формой в виде сплющенного цилиндра с размещенным в них водным льдом (Процесс теплообмена воздушной струи при контакте с нетаящим льдом. Подвигин К.А. Вестник академии гражданской защиты
40 (Научная электронная библиотека «Elibrary.ru» «Вестник академии гражданской защиты», научный журнал. - Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, выпуск 4 (24), стр. 56-61, от 29.12.2020 г. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/content.asp>, свободный. - Загл. с экрана. - Яз. Рус.)).

Эксплуатация известного устройства не обеспечивает устойчивую нормализацию
45 микроклимата рабочей зоны по тепловому фактору в необходимом ее объеме в течение продолжительного времени, что вызвано недостаточным охлаждением потока воздуха в процессе прохождения его через внутренний объем устройства. Это вызвано тем, что при контакте воздуха с гладкой поверхностью капсул в виде сплющенного цилиндра

осуществляется низкий конвективный теплообмен, обусловленный ламинарным движением воздуха и малым временем его контакта с капсулами, имеющими невысокую поверхность теплообмена и недостаточную температуру водного льда (при атмосферном давлении 760 мм рт.ст. температура составляет - 1 °С), а также отводом охлажденного воздуха из устройства с низкой скоростью.

В основу полезной модели поставлена задача усовершенствования устройства охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки, в которой за счет конструктивных особенностей обеспечивается интенсификация охлаждения потока воздуха при его прохождении через внутренний объем устройства путем улучшения конвективного теплообмена за счет создания турбулентного движения потока воздуха при контакте с капсулами пониженной температуры с большей площадью поверхности и его дополнительного охлаждения с увеличением скорости на выходе, что приводит к устойчивой нормализации микроклимата по тепловому фактору в локальной рабочей зоне горной выработки большого объема в течение длительного времени.

Поставленная задача решается тем, что в устройстве для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки, содержащем теплоизолированный корпус в виде параллелепипеда с выполненными в противоположных боковых стенках входным и выходным люками для прохода воздуха, внутренний объем которого разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам корпуса перегородками с проемами на теплообменные камеры, в каждой из которых параллельно перегородкам расположены выдвижные перфорированные полки с размещенными на них аккумуляторами холода, выполненными в виде капсул из термопластичного полимера с размещенным в них льдом, согласно полезной модели капсула выполнена с поперечными пережимами вдоль ее продольной оси, образующими ячейки в виде вытянутого эллипсоида вращения, а в качестве льда размещен водосоляной лед, при этом в теплообменной камере со стороны выходного люка установлено взаимосвязанное с ним сопло Лавая.

Интенсификация охлаждения обеспечивается улучшением конвективного теплообмена за счет изменения геометрии поверхности капсулы, вызывающей турбулентное движение потока воздуха, увеличения площади контактной поверхности, размещения в капсуле водосоляного льда с пониженной температурой, а также за счет дополнительного охлаждения при попадании в сопло Лавая с увеличением скорости на выходе из устройства. При контакте потока воздуха с поверхностью капсул в местах ее пережимов и при обтекании ячеек в виде вытянутого эллипсоида происходит его завихрение, вызывающее турбулентное движение потока, приводящее к снижению его скорости, которая наряду с повышенной площадью контакта приводит к увеличению времени контакта воздуха с капсулой, заполненной водосоляным льдом и, как следствие, к улучшению конвективного теплообмена. Далее поток воздуха подвергается дополнительному охлаждению за счет снижения абсолютной температуры и давления при прохождении сопла Лавая с увеличением скорости на выходе из устройства.

Сущность полезной модели поясняется чертежами, где на фиг. 1 показано устройство охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки, продольное сечение; на фиг. 2 - ячейка капсулы, продольное сечение.

Устройство содержит выполненный в виде параллелепипеда корпус 1, выполненный из оцинкованной листовой стали с теплоизолирующим слоем 2 из пенополистирола. В противоположные боковые стенки 3 и 4 вмонтированы входной и выходной люки 5 и 6 соответственно для прохода воздуха с откидными крышками 7, две другие

противоположные боковые стенки выполнены съемными.

Внутренний объем корпуса 1 разделен по высоте установленными параллельно верхней и нижней стенкам 8, 9 воздухонепроницаемыми перегородками 10 с проемами 11 на нечетное число теплообменных камер 12. При этом верхняя теплообменная камера 5 взаимосвязана с входным люком 5, а нижняя камера с выходным люком 6. С внутренней стороны противоположных боковых стенок 3 и 4 расположены металлические направляющие 13, на которых размещены выдвижные перфорированные полки 14, например решетчатые.

На каждой полке 14 размещены капсулы 15, выполненные из термопластичного полимера, например полиэтилена толщиной не менее 150 мкм. Капсулы 15 выполнены с поперечными пережимами 16 вдоль ее продольной оси, образующими ячейки 17 в виде вытянутого эллипсоида вращения. В капсулах 15 размещен водосоляной лед 18 с концентрацией NaCl - 23% (при атмосферном давлении 760 мм рт.ст. температура плавления/кристаллизации водосоляного льда составляет -21°C). Капсулы 15 15 расположены на полках 14 теплообменных камер 12 по длине полки 14 в один слой и в несколько рядов по ее ширине, причем нижний слой капсул расположен на поверхности нижней стенки 9 корпуса 1. В нижней теплообменной камере со стороны выходного люка 6 установлено взаимосвязанное с ним сопло Лавалю 19.

Для подачи охлаждаемого воздуха во внутренний объем устройства предусмотрено размещение у передней боковой стенки корпуса вентилятора местного проветривания (на чертеже не показан) для взаимосвязи с устройством посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20, подсоединяемого к входному люку 3. Для направления охлажденного воздуха в локальную рабочую зону подземной горной выработки предусмотрен подсоединяемый к выходному люку 4 воздушный трубопровод 21. Устройство смонтировано на платформе 22 шахтной вагонетки для транспортирования по железнодорожным путям 23 с помощью электровозов, лебедок или вручную.

Устройство работает следующим образом.

Для подготовки устройства к работе вручную открываются крышки 7 люков 5 и 6, смонтированных в боковые стенки 3, 4 корпуса 1 с теплоизолирующим слоем 2. Посредством гибкого вентиляционного трубопровода 20 вентилятор местного проветривания соединяется с входным люком 3 устройства. Поток охлаждаемого воздуха по трубопроводу 20 подается через входной люк 3 в верхнюю теплообменную камеру 12, где разделяется на отдельные потоки, которые перемещаясь вдоль верхней стенки 8 и расположенных на направляющих 13 перфорированных полок 14, контактируют с поверхностью капсул 15, размещенных на полках 14. Выполнение полок 14 перфорированными обеспечивает наиболее полный контакт воздуха с капсулами 15. Двигаясь вдоль ячеек 17 в виде вытянутого эллипсоида вращения и проходя места пережимов 16, воздушный поток сталкивается и обтекает их, в результате чего возникает его завихрение и поток приобретает турбулентное движение. По мере продвижения турбулентного потока воздуха по теплообменной камере и его контакта с поверхностью капсул происходит постепенное охлаждение воздуха. Турбулентное движение потока воздуха наряду со значительной площадью поверхности теплообмена и низкой температурой размещенного в капсуле 15 водосоляного льда 18 обеспечивают улучшение конвективного теплообмена, интенсифицируя процесс охлаждения. Размещение в капсуле водосоляного льда обеспечивает снижение его температуры плавления за счет того, что кроме процесса плавления также протекает процесс растворения соли в воде, сопровождаемый понижением температуры плавления

водосоляного льда. Кроме снижения температуры плавления водосоляного льда также происходит увеличение длительности этого процесса, что приводит к увеличению длительности рабочего цикла устройства и снижению температуры воздуха подаваемого в локальную рабочую зону.

5 Воздух из верхней теплообменной камеры 12 через проемы 11 воздухонепроницаемых перегородок 10 последовательно перетекает в нижележащие камеры и подвергается
дальнейшему охлаждению. Попадая в нижнюю камеру и контактируя в процессе
перемещения с капсулами, размещенными на полках и поверхности нижней стенки 9,
воздух направляется в сопло Лавалья 19, где происходит его дополнительное охлаждение
10 за счет снижения абсолютной температуры и давления со значительным увеличением
его скорости. Перемещаясь далее через воздушный трубопровод 21, с высокой
скоростью интенсивно охлажденный поток воздуха поступает в горную выработку.
При истечении охлажденного потока воздуха из воздушного трубопровода 21 с большой
15 скоростью, он попадает в спутный поток горячего воздуха горной выработки и
постепенно смешивается с ним, охлаждая локальную рабочую зону значительного
объема. Сниженная температура и увеличенная скорость воздушного потока на выходе
из устройства позволяют устойчиво нормализовать микроклимат по тепловому фактору
при температуре спутного потока горячего воздуха в выработке до 34°C со скоростью
до 2 м/с на расстоянии до 6 м.

20

(57) Формула полезной модели

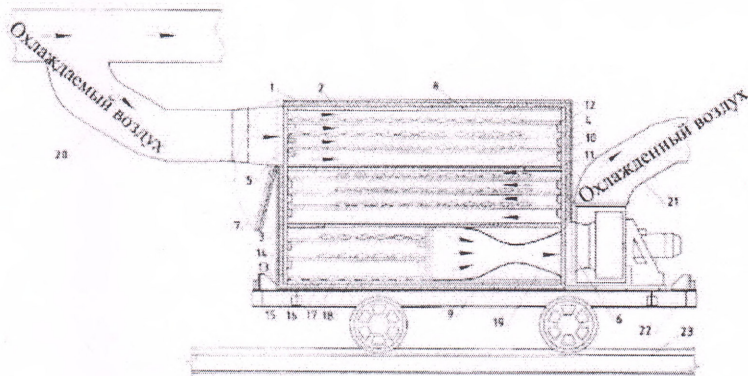
Устройство для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной
выработки, содержащее теплоизолированный корпус в виде параллелепипеда с
выполненными в противоположных боковых стенках входным и выходным люками
25 для прохода воздуха, внутренний объем которого разделен по высоте установленными
параллельно верхней и нижней стенкам корпуса перегородками с проемами на
теплообменные камеры, в каждой из которых параллельно перегородкам расположены
выдвижные перфорированные полки с размещенными на них аккумуляторами холода,
выполненными в виде капсул из термопластичного полимера с размещенным в них
30 льдом, отличающееся тем, что капсула выполнена с поперечными пережимами вдоль
ее продольной оси, образующими ячейки в виде вытянутого эллипсоида вращения, а
в качестве льда размещен водосоляной лед, при этом в теплообменной камере со
стороны выходного люка установлено взаимосвязанное с ним сопло Лавалья.

35

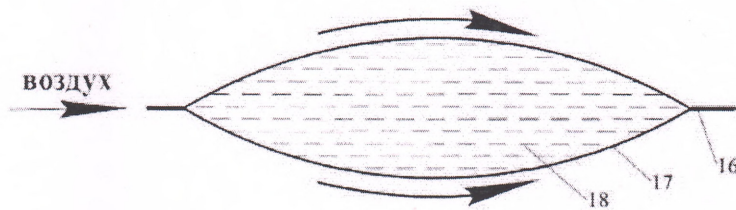
40

45

1



Фиг. 1



фиг. 2

СОГЛАСНО ОРИГИНАЛУ
Ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.008.01
И.А. Бершадский

ДОЛГОМОНТАЖНО-РЕСТАВРАЦИОННО-ПРОЕКТИРОВАТЕЛЬСКО-СТРОИТЕЛЬНО-МОНТАЖНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
КОД 2070826
ВНЕШНЕЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОТНОШЕНИЯ И ТОВАРИЩЕСТВО
ИЗДАНИЕ