

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)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Донецк – 2022 г.

**Работа выполнена в ГОСУДАРСТВЕННОМ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОМ УЧРЕЖДЕНИИ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»** Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики, г. Донецк

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
**Кавера Алексей Леонидович,**  
ГОУВПО «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (г. Донецк),  
заведующий кафедрой «Охрана труда и аэрология им. И.М. Пугача»

Официальные оппоненты: **Малеев Николай Владимирович**  
доктор технических наук,  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ «ДОНЕЦКИЙ ЭКСПЕРТНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР» (г. Донецк), начальник

**Коробицына Мария Александровна**  
кандидат технических наук,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург), ассистент кафедры «Информатика и компьютерные технологии»

Ведущая организация: ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ» (г. Макеевка)

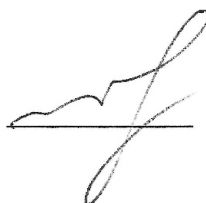
Защита состоится «16» февраля 2023 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 01.008.01 в ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 1, ауд. 203. Тел./факс: 380(62) 304 30-55, e-mail: [uchensovet@donntu.ru](mailto:uchensovet@donntu.ru).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «ДОННТУ» по адресу: 283001, г. Донецк, ул. Артёма, 58, корпус 2. Адрес сайта университета: <http://donntu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_\_»

2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 01.008.01,  
доктор технических наук, доцент



И.А. Бершадский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**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...305 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 и 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 ходе ведения аварийно-восстановительных и ремонтных работ возникает потребность снижения температуры рудничного воздуха в локальных рабочих зонах до величины, допустимой ПБ в угольных шахтах. Во время выполнения 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, полученного 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 последствий аварий и инцидентов.

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, 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 и 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 обстановке.

**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 и техническое задание на установку для охлаждения воздуха, а также 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 локальной рабочей зоне горной выработки.

**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 процессов 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.

**Реализация работы.** Результаты работы вошли в «Технические требования к установке для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки», разработанные кафедрой «Охрана труда и аэрология» ГОУВПО «ДОННТУ».

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.

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 ДНР: «МАКНИИ»; НИИГД «РЕСПИРАТОР».

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.).

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

Результаты работы приняты к рассмотрению ОГВГСО г. Донецк МЧС ДНР.

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».

**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.

**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 со спутным потоком воздуха 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 странице 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы идея, цель, задачи исследований, основные научные положения, выносимые на защиту и новизна полученных результатов, приведены теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, апробация и публикации результатов диссертации.

**В первом разделе** выполнен обзор научных исследований по улучшению условий труда горнорабочих при работе в нагревающем микроклимате; проанализированы известные способы и технические средства нормализации параметров микроклимата в горных выработках. Анализ результатов проведенных исследований позволил сформулировать идею, цель и задачи исследования.

**Во втором разделе** выполнены исследования теплообменных процессов охлаждаемого воздуха с аккумуляторами холода и взаимодействия охлажденной воздушной струи со спутным потоком воздуха в охлаждаемой рабочей зоне.

Из работ профессора А.В. Брушкова известно, что снижение температуры замерзания растворов достигается путем ввода соли в их состав. При замораживании эвтектического водного раствора некоторых солей получают эвтектический лед, который имеет температуру, соответствующую криогидратной точке. Криогидратной точке соответствует эвтектическая концентрация соли.

Перспективным способом снижения температуры воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки при ведении аварийно-восстановительных и ремонтных работ является применение установок охлаждения воздуха имеющих в своем арсенале аккумуляторы холода на основе льдосодержащих хладагентов.

Наибольшее распространение в системах охлаждения воздуха получил эвтектический лед из раствора поваренной соли (NaCl), температура плавления которого составляет 251,9 К, а теплота плавления 236 кДж/кг.

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

Расчет параметров установки, в том числе определение количества аккумуляторов холода выполняем в зависимости от необходимой производительности (объема охлаждаемого воздуха) и длительности цикла ее работы. Под циклом работы следует понимать длительность функционирования установки с момента ее пуска до достижения в охлаждаемой рабочей зоне температуры  $T \leq 299$  К.

Исследование процессов теплообмена необходимо начинать с рассмотрения процесса фазового перехода льдосоляной смеси, размещенной в аккумуляторах холода. Так как каждую ячейку аккумулятора холода можно представить в виде цилиндра некоторой длины (рисунок 1).



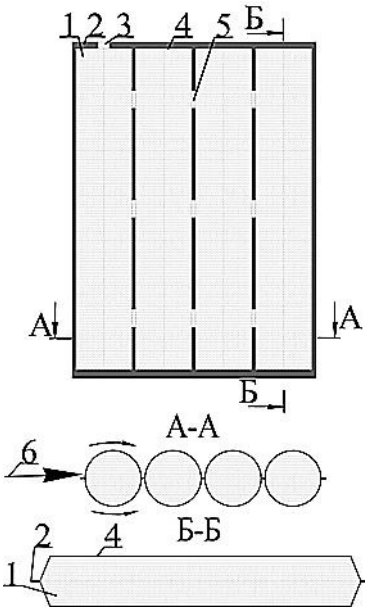


Рисунок 1 – Схема аккумулятора холода (вид сверху): 1 – льдосоляная смесь; 2 – сварной шов; 3 – заливное отверстие; 4 – ячейка аккумулятора холода; 5 – канал для прохода рассола; 6 – направление движения охлаждаемого воздуха вдоль аккумулятора холода.

Температуру в аккумуляторе холода определяем, используя уравнение вида,

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \alpha (T_0 - \theta), \quad (1)$$

где  $\theta$  – температура аккумулятора холода (льдосоляной смеси), К;

$T_0$  – температура охлаждаемого воздушного потока, К;

$a$  – коэффициент теплообмена льдосоляной смеси с внешней средой, 1/с;

$\tau$  – время, с.;

$x$  – продольная координата вдоль аккумулятора холода, м;

$\alpha$  – коэффициент температуропроводности аккумулятора холода, м<sup>2</sup>/с.

Константу скорости плавления льдосоляной смеси в зависимости от температуры представим соотношением

$$k = A \exp(-E_A / C_p T_0), \quad (2)$$

где  $A$  – предэкспоненциальный множитель, 1/с.;

$E_A$  – энергия плавления льдосоляной смеси, Дж/моль;

$C_p$  – удельная теплоемкость льдосоляной смеси, Дж/(К·моль).

При начальной массе льдосоляной смеси, равной  $m(0) = m_0$ , будем иметь

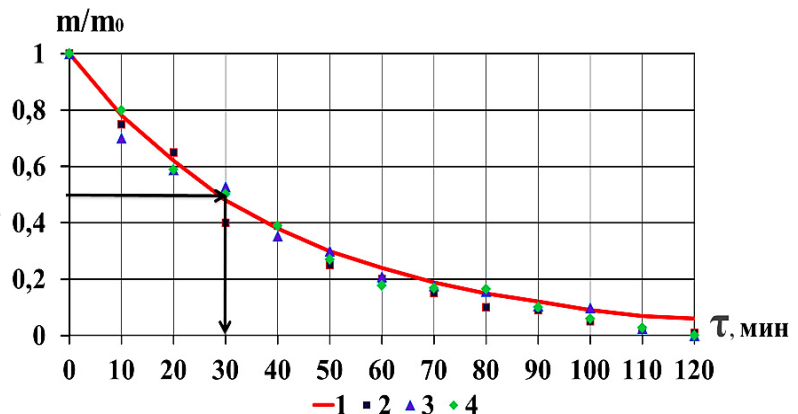
$$m = m_0 \exp[-A \exp(-E_A / C_p T) \tau]. \quad (3)$$

Такой подход дает возможность выразить зависимость процесса плавления льдосоляной смеси от температуры охлаждаемого воздуха и от времени. Предэкспоненциальный множитель  $A$ , входящий в уравнение (3), является заранее неизвестной величиной, но его можно определить, зная период плавления льдосоляной смеси наполовину – равен  $k = 4 \cdot 10^{-4}$  1/с.

На рисунке 2 построена кривая фазового перехода льдосоляной смеси от времени с начала ее плавления, найденная при константе скорости плавления.

Рисунок 2 – Кривая фазового перехода льдосоляной смеси от времени с начала ее плавления:

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



С целью обоснования параметров установки разработана математическая модель процессов теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода.

В ходе исследований процессов теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода получена система уравнений,

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} = a_1 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + b(\theta - T), \\ \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b(T - \theta), \end{cases} \quad (4)$$

где  $T$  – температура охлаждаемого воздушного потока, К;

$\theta$  – температура аккумуляторов холода, К;

$a_1$  – коэффициент температуропроводности воздуха, м<sup>2</sup>/с.;

$a$  – коэффициент температуропроводности аккумуляторов холода, м<sup>2</sup>/с.;

$u$  – продольная скорость воздуха, м/с.;

$x$  – продольная, вдоль теплообменной камеры, координата, м;

$b$  – коэффициент теплообмена воздуха с аккумуляторами холода, 1/с.

Из-за сложности системы уравнений (4) использован численный метод, для чего производные представим в конечных разностях

$$\begin{cases} \frac{\Delta T}{\Delta \tau} + u \frac{\Delta T}{\Delta x} = a_1 \frac{\Delta^2 T}{\Delta x^2} + b(\theta - T), \\ \frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} = a \frac{\Delta^2 \theta}{\Delta x^2} + b(T - \theta). \end{cases} \quad (5)$$

Приняв скорость охлаждаемого воздуха постоянной, представим полученные уравнения (5) в критериальном виде

$$\begin{cases} T_{m,n+1} = (Cu + Fo)T_{m-1,n} + (1 - Cu - 2Fo - \gamma)T_{m,n} + FoT_{m+1,n} + \gamma\theta_{m,n}, \\ \theta_{m,n+1} = Fo\theta_{m-1,n} + (1 - 2Fo - \gamma)\theta_{m,n} + Fo\theta_{m+1,n} + \gamma T_{m,n}, \end{cases} \quad (6)$$

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

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

$\gamma = b\Delta t$  – безразмерный параметр интенсивности теплообмена со стенками теплообменной камеры;

$m$  – номер узла сетки при условном разбиении отрезка по длине установки;

$n$  – номер узла по времени.

На рисунке 3 представлено условное разбиение на отрезки по длине установки и по времени.

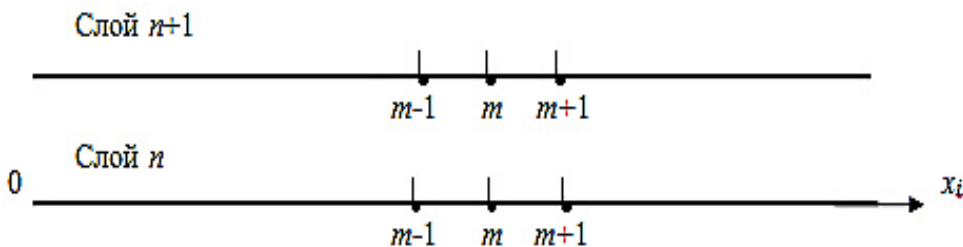


Рисунок 3 – Номера узлов по длине установки и по времени

На рисунке 4 приведена схема движения воздуха в установке для охлаждения воздуха.

Рисунок 4 – Схема движения воздушного потока в установке для охлаждения воздуха



При расчетах необходимо принимать на поворотах потока воздуха параметр интенсивности теплообмена  $\gamma=0$ , так как в этих местах будут отсутствовать аккумуляторы холода.

На рисунке 5 представлены результаты расчета по первой формуле системы уравнений (6) при заданных коэффициентах для льдосоляной смеси.

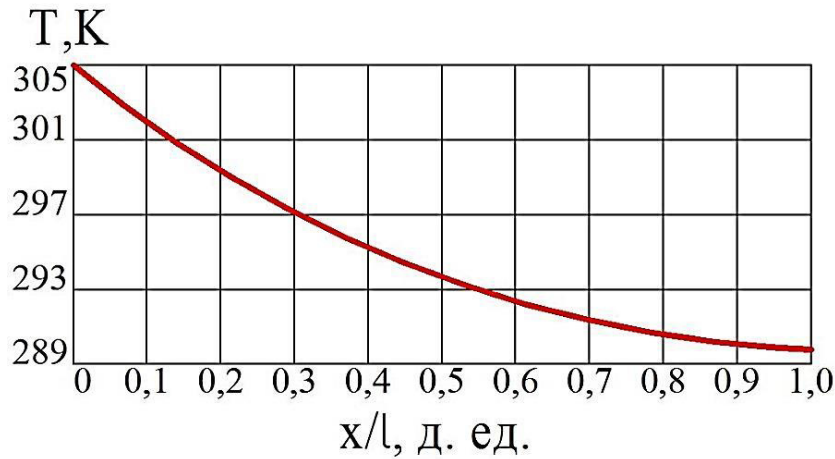


Рисунок 5 – Распределение температуры в установке охлаждения воздуха по ее длине.

Как видно из рисунка 5, при коэффициентах первой формулы системы уравнений (6), равных

$$Cu = 0,5; Fo = 0,1; \gamma = 0,3, \quad (7)$$

воздух от температуры 305 К постепенно охлаждается до температуры 290 К.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса теплообмена воздушной струи при контакте с аккумуляторами холода дает возможность исследовать, как охлаждается воздух в установке.

В этом же разделе исследована дальность подачи струи охлажденного воздуха в проветриваемую горную выработку. При истечении из вентиляционного трубопровода установки струя попадает в спутный поток воздуха и постепенно смешивается с ним. Распад струи приводит к ее утолщению и падению скорости вдоль ее оси. Изменение температуры воздуха при удалении от установки по ходу движения охлажденной воздушной струи определяем по формуле

$$T = T_1 + (T_0 - T_1) \exp\left(-\frac{x+Cx^2/2d}{w_0} b\right), \quad (8)$$

где  $T_0$  – температура охлаждаемого воздуха, К;

$T_1$  – температура охлажденного воздуха, К;

$w_0$  – начальная скорость охлажденной воздушной струи, м/с.;

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

$x$  – дальность охлаждения воздушной струи, м;

$d$  – начальный диаметр охлажденной воздушной струи, м;

$C$  – эмпирическая константа, 1.

Для определения дальности охладенной струи воздуха используем уравнение

$$x = \int_0^{\tau} w(\tau) d\tau = \frac{d}{c} \ln(1 + Cw_0 \tau/d), \quad (9)$$

где  $w_0$  – начальная скорость истечения воздушной струи из установки, м/с.;

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

$\tau$  – время движения охладенной струи воздуха, с.

Для определения максимальной площади поперечного сечения струи охладенного воздуха используем уравнение

$$S_m = \left( \frac{aGl}{\rho} \right)^{0,8}, \quad (10)$$

где  $a$  – эмпирическая константа, с/м<sup>1,5</sup>;

$G$  – расход струи охладенного воздуха на один квадратный метр, кг/(с·м<sup>2</sup>);

$\rho$  – плотность охладенного воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$l$  – длина охладенной воздушной струи до распада, м.

**В третьем разделе** разработан план многофакторного эксперимента при исследовании охлаждения воздуха аккумуляторами холода в горной выработке, представлены результаты экспериментальных исследований по изучению процесса теплообмена между воздушным потоком аккумуляторами холода, на основе планирования экспериментальных исследований, аргументированной методики и обработки данных исследований.

Необходимое количество экспериментальных данных для установления достоверной регрессионной зависимости определялось при построении D-оптимального плана экспериментальных исследований. Для перебора всех возможных сочетаний, определяющих факторов по известной методике, составлена матрица ортогонального планирования эксперимента второго порядка для  $k^3$ . Для проверки воспроизводимости опытов рассчитано значение критерия Кохрена. Расчетное значение критерия Кохрена составило  $G_p = 0,21$ , табличное значение данного коэффициента составляет  $G_T = 0,3346$  следовательно испытания можно считать воспроизводимыми, а оценки дисперсии – однородными. Дисперсия воспроизводимости согласно расчету составляет  $S_{(y)}^2 = 0,64$ . Для оценки среднеквадратического отклонения коэффициентов уравнения регрессии использовано распределения Стьюдента. На адекватность уравнение регрессии проверялось по критерию Фишера. Так как  $F_{\text{расч}} = 2,4 < F_{\text{табл}} = 3,68$ , то уравнение регрессии адекватно. Полученное уравнение регрессии с использованием натуральных величин имеет следующий вид:

$$T_1 = 23,98 + 0,96 \cdot T_0 - 30,1 - 0,28 \cdot S + 6,01 + 0,45 \cdot w_0 + 1,35 + (-0,96 \cdot T_0)^2 + (-0,28 \cdot S + 6,01)^2 - (0,45 \cdot w_0 + 1,35)^2 + 0,46 \cdot (-0,28 \cdot S + 6,01) \cdot 0,45 \cdot w_0 + 1,35, \quad (11)$$

где  $T_1$  – температура охладенного воздуха, К;

$T_0$  – температура охлаждаемого воздуха, К;

$S$  – площадь теплообменной поверхности аккумуляторов холода, м<sup>2</sup>;

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

Экспериментальные исследования характеризуют реальный процесс охлаждения воздуха посредством контакта с аккумуляторами холода, воспроизводимый на специальном экспериментальном образце установки, схема которой представлена на рисунке 6.

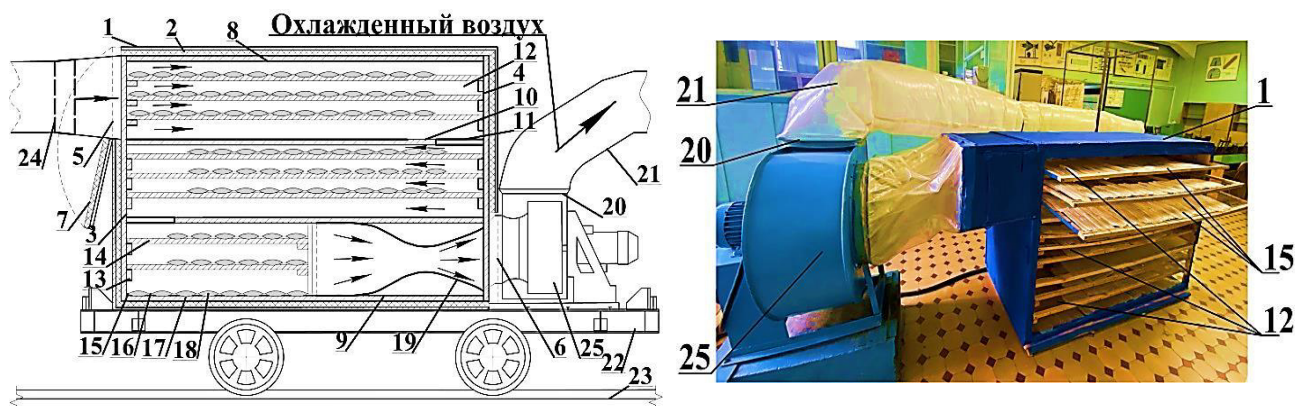


Рисунок 6 – Схема и внешний вид установки для охлаждения воздуха (расшифровка обозначений приведена в тексте)

Для подготовки установки к работе открываются крышки 7 люков 5 и 6, вмонтированных в торцевые стенки 3, 4 корпуса 1 с теплоизолирующим слоем 2. Расход воздуха через установку обеспечивается вентилятором 25, регулирование расхода воздуха осуществляется шибером 24 или 20. Кожух вентилятора 25, для исключения дополнительного нагрева воздуха исходящего из установки, теплоизолирован. Охлаждаемый воздух подается через входной люк 5 в верхнюю теплообменную камеру 12, где разделяется на отдельные потоки, которые перемещаясь параллельно верхней стенке 8 и расположенных на направляющих 13 полок 14, контактируют с поверхностью аккумуляторов холода 15, размещенных на полках 14. Двигаясь вдоль ячеек аккумуляторов холода и проходя места сварных швов 16, воздушный поток обтекает их, в результате чего возникает его завихрение и поток приобретает турбулентность. Турбулентное движение потока воздуха наряду со значительной площадью поверхности теплообмена и низкой температурой, размещенной в ячейках 15 льдосоляной смеси 18 обеспечивают улучшение конвективного теплообмена, интенсифицируя процесс охлаждения.

Воздух из верхней теплообменной камеры 12 через проемы 11 воздухопроницаемых перегородок 10 последовательно перетекает в нижележащие камеры и подвергается дальнейшему охлаждению. Попадая в нижнюю камеру и контактируя в процессе перемещения с аккумуляторами холода, размещенными на полках и поверхности нижней стенки 9, воздух направляется в выходное сопло 19. Перемещаясь далее через воздушный трубопровод 21, охлажденный поток воздуха поступает в охлаждаемую зону.

Лабораторные и опытно-промышленные эксперименты по исследованию эффективности охлаждения воздуха проведены на экспериментальном образце установки в условиях, не требующих учета коэффициента подобия. Полученные данные, позволяют составить информационный массив как систему на основе теплообмена в процессе взаимодействия воздушного потока с аккумуляторами



холода в установке и стали основой при разработке методики расчета параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.

Для установления зависимости времени цикла работы от количества аккумуляторов холода, помещенных в теплообменные камеры установки, проведена серия испытаний. Испытания установки проводились с 50; 75; 100% загрузкой теплообменных камер аккумуляторами холода (рисунок 7). В теплообменных камерах установки при 100% загрузке размещается 500 аккумуляторов холода (один аккумулятор холода содержит 200 грамм льдосоляной смеси).

Рисунок 7 – Зависимость длительности цикла работы установки от количества аккумуляторов холода помещенных в ее теплообменные камеры:

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

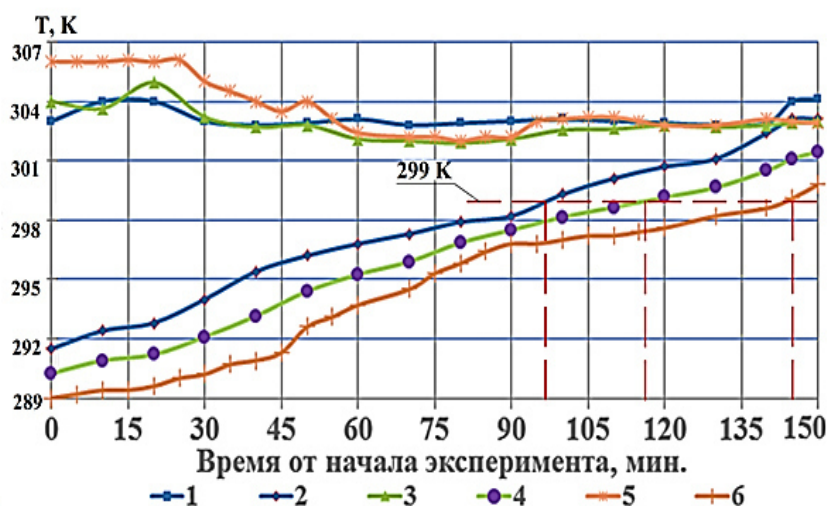


Схема проведения испытаний установки для охлаждения воздуха в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС МЧС ДНР показана на рисунке 8.



Рисунок 8 – Схема проведения испытаний установки в учебной шахте для охлаждения воздуха (вид сверху): 1-12 – точки замера параметров воздуха на замерных станциях в ходе испытаний.

Данные, полученные в ходе испытаний, представлены на рисунках 9,10,11,12.

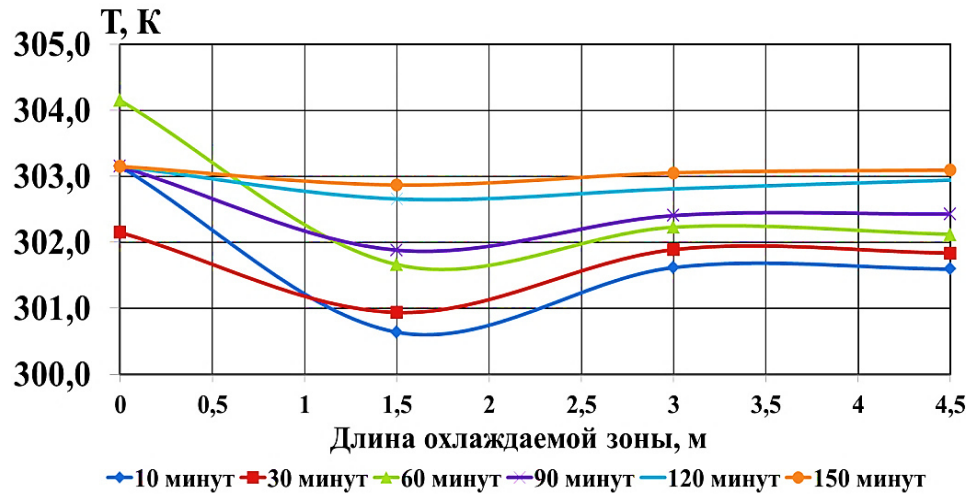


Рисунок 9 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 1,2,3

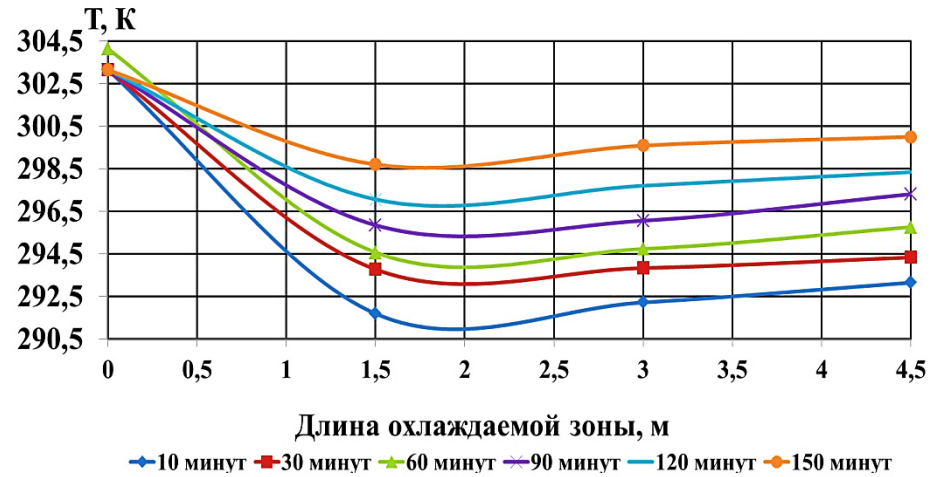


Рисунок 10 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 4,5,6

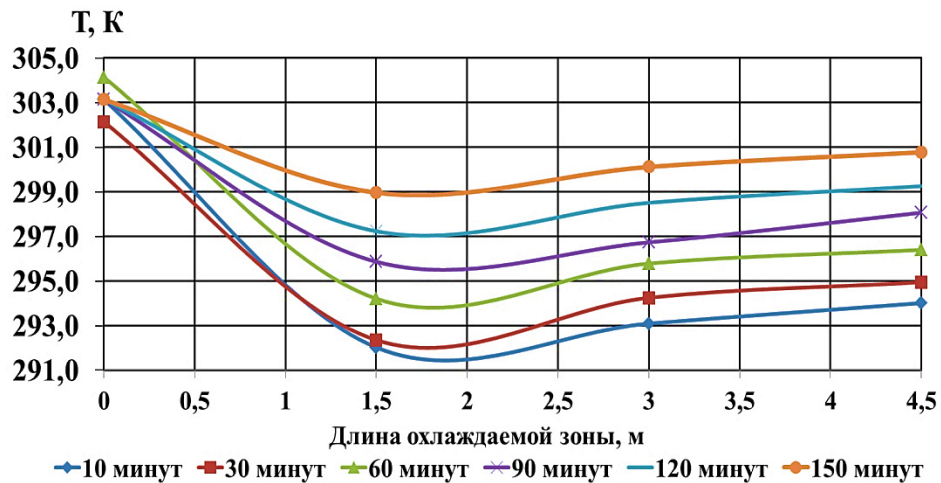


Рисунок 11 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 7,8,9

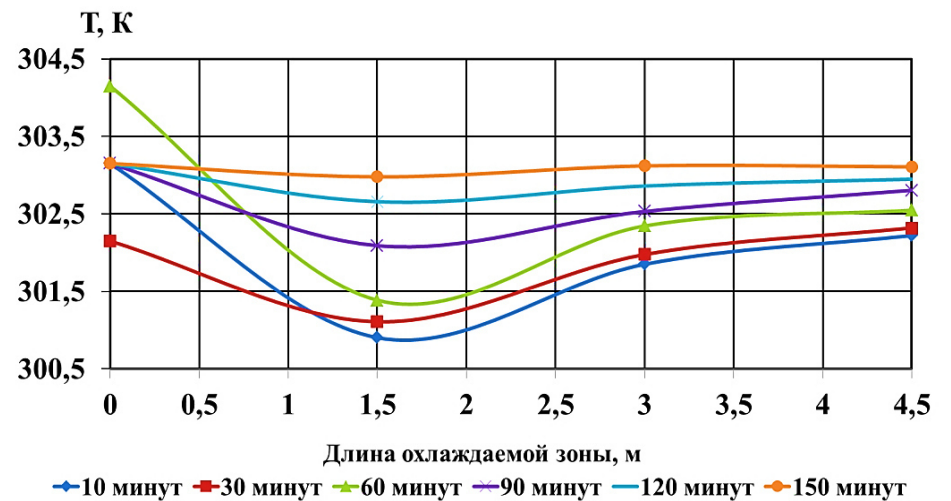
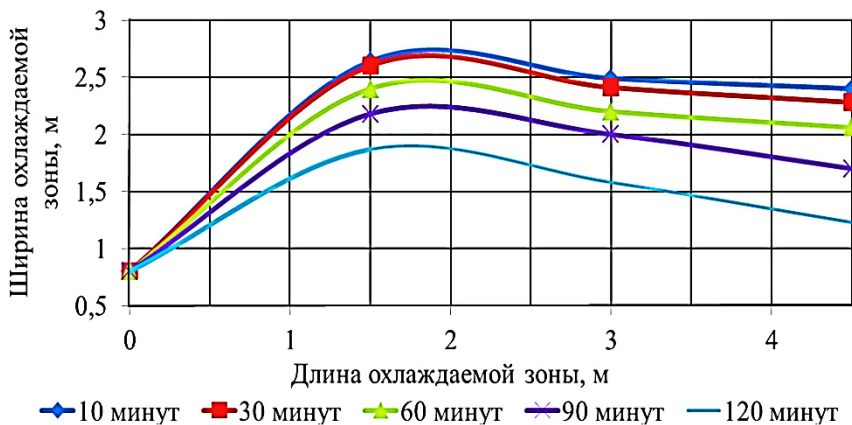


Рисунок 12 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 10,11,12

Для определения ширины рабочей зоны, где обеспечивалась температура воздуха  $T \leq 299 \text{ K}$ , была выполнена линейная интерполяция значений температуры воздуха между точками: 1-4; 2-5; 3-6; 7-10; 8-11; 9-12 (рисунок 8). Данные полученные в ходе линейной интерполяции приведены в виде графика (рисунок 13) по длине и ширине охлаждаемой зоны.

Рисунок 13 – График зависимости ширины охлаждаемой зоны от времени, прошедшего с начала работы установки и от удаления от нее



Согласно результатам сравнения данных теории и эксперимента

(рисунок 14), наилучшего приближения между ними можно достичь при коэффициенте теплообмена  $b = 0,1 \text{ 1/с}$ .

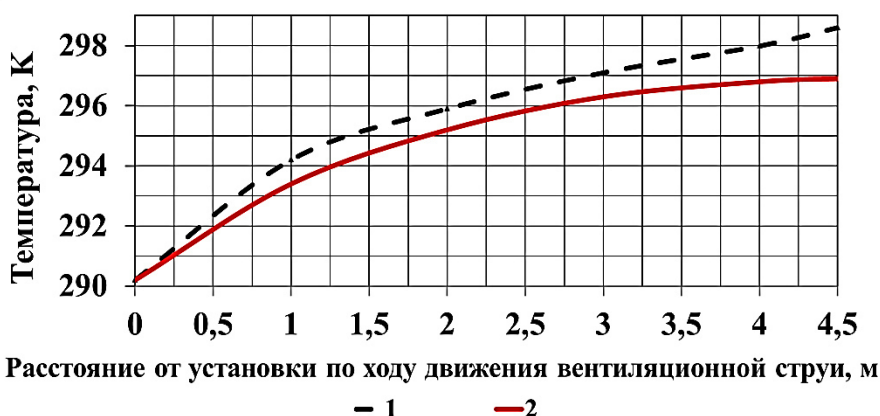


Рисунок 14 – График изменения температуры воздуха по длине охлаждаемой зоны (10 минут от начала работы установки):

1 – экспериментальные данные;

2 – расчетные данные.

Сравнение данных теории и эксперимента показали, что среднеквадратическая ошибка расчетных данных не превышает 20%.

В четвертом разделе разработана методика расчета параметров охлаждаемой рабочей зоны горной выработки, а также разработана тактика и обоснована возможная область применения установки для охлаждения воздуха.

Основы норм микроклимата в шахтах заложены в ПБ. В горных выработках, где в течение смены находятся люди, температура воздуха должна соответствовать нормам, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

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	75% и меньше	75% и меньше
до 0,25	297,2	297,2	297,2
0,26-0,50	299,2	299,2	299,2
0,51-1,00	299,2	299,2	299,2
1,01 и более	299,2	299,2	299,2



На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований установлены технические требования к установке (таблица 2).

Таблица 2

Основные технические требования к установке охлаждения воздуха

№ п/п	Наименование показателей	Значение	
1	Температура охлажденного воздуха (10 мин. от начала работы установки), $T_1$ , К	290-296	
	при выполнении следующих граничных условий:		
	температура охлаждаемого воздуха, $T_0$ , К	301-305	
	начальная температура аккумуляторов холода, Т, К	253	
	площадь теплообменной поверхности аккумуляторов холода, $S$ , м <sup>2</sup>	13,5-27,0	
	начальная масса льдосоляной смеси, кг,	при $S = 13,5$ , м <sup>2</sup>	50
		при $S = 27,0$ , м <sup>2</sup>	100
скорость охлажденной воздушной струи на выходе из установки (при диаметре вентиляционного трубопровода $d = 0,8$ м), $w_0$ , м/с.,	2-4		
2	Время подготовки к работе, минут, не более	15	
3	Масса (без вентилятора и аккумуляторов холода), кг, не более	150	
4	Габаритные размеры (без вентилятора), м, ширина/длина/высота, не более	1,1/2,0/1,3	

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования обоснованного способа охлаждения воздуха, позволили определить изменение ширины охлаждаемой рабочей зоны и время цикла работы установки для охлаждения воздуха (таблица 3).

Таблица 3

Изменение ширины охлаждаемой рабочей зоны при удалении от установки, в которой обеспечивается температура  $T \leq 299$  К

Т, мин.	Ширина зоны на расстоянии 1,5 м	Ширина зоны на расстоянии 3 м	Ширина зоны на расстоянии 4,5 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	-	-

Охлаждаемый воздух должен соответствовать требованиям (таблица 4).

Таблица 4

Основные требования к охлаждаемому воздуху

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура, К	до 305
2	Относительная влажность, %	до 100
3	Запыленность, мг/м <sup>3</sup>	до 100
4	Барометрическое давление, МПа	от 0,097 до 0,12
5	Скорость движения воздуха в горной выработке, м/с	от 0,2 до 2

Установка может быть эффективно использована:

1) в условиях локальных зон (на расстоянии до 4,5 м) горных выработок;

- 2) в технологических зонах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов, создающих значительные техногенные тепловые потоки;
- 3) при устранении последствий аварии или инцидента (стыковка конвейерной ленты и т.д.);
- 4) при выполнении горноспасательных работ.

## **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. 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.

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 – 305 К, что приводит к тепловому поражению организма горнорабочих. Предложен способ нормализации температуры воздуха посредством применения 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 параметров аккумуляторов холода (оптимальные соотношения льда и соли NaCl), их рабочей температуры, а также время эффективного теплопоглощения в зависимости от скорости воздуха в установке, его температуры и массы льдосоляной смеси.

5. 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.

6. В результате лабораторных и промышленных испытаний разработано «Техническое задание на установку для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», согласованные с ведущими

организациями по безопасности работ в горной промышленности: «МАКНИИ»; НИИГД «РЕСПИРАТОР».

7. Разработаны «Методические рекомендации по расчету параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», согласованные с НИИГД «РЕСПИРАТОР».

8. Решение актуальной научно-технической задачи по нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки позволило обеспечить безопасные условия труда горнорабочих при ведении аварийно-восстановительных и ремонтных работ, а также имеет значимый социальный эффект, так как снижает количество смертей шахтеров от воздействия тепловых факторов.

### **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

Публикации в рецензируемых изданиях ВАК Минобрнауки ДНР:

1. Подвигин, К.А. Процессы теплообмена воздушной струи при контакте с натающим льдом / К.А. Подвигин // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2020. – Вып. 4 (24). – С. 56-61.
2. Подвигин, К.А. Исследование дальности подачи охлаждённого воздуха в поток нагретой струи в горной выработке / К.А. Подвигин // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – Вып. 1 (25). – С. 62-68.
3. Булгаков, Ю.Ф. Математическая модель процессов теплообмена воздушной струи при контакте со льдом / Ю.Ф. Булгаков, К.А. Подвигин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 1 (58). – С. 56-61.
4. Подвигин, К.А. Закономерности движения струи охлажденного воздуха в горной выработке / К.А. Подвигин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 2 (58). – С. 109-117.
5. Кавера, А.Л. Нормализация температурного режима в локальной зоне горной выработки установкой оснащенной аккумуляторами холода / А.Л. Кавера, К.А. Подвигин // «Вестник Академии гражданской защиты»: научный журнал. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – Вып. 4 (28). – С. 75-85.

Публикации в других изданиях:

6. Подвигин, К.А. Физико-математическая модель охлаждения воздуха льдом / К.А. Подвигин // Вестник молодежной науки. - 2020. - №5(27). – 8 с.
7. Булгаков, Ю.Ф. Противотепловая защита горнорабочих при добыче нефти подземным способом / Ю.Ф. Булгаков, И.Ф. Марийчук, К.А. Подвигин // Проблемы горного давления: сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2017. – Вып. 2 (33). – С. 3-10.

Публикации в сборниках материалов международных научно-практических конференций:

8. Кавера, А.Л. Тактико-технические характеристики установки локального охлаждения рудничного воздуха льдом/ А.Л. Кавера, К.А. Подвигин //

Донбасс будущего глазами молодых ученых: сборник материалов научно-технической конференции. Донецк, 2021. С.86-90.

9. Подвигин, К.А. Нормализация тепловых условий в локальных зонах горных выработок глубоких шахт Донбасса / К.А. Подвигин // Проблемы горного дела: сб. науч. тр. II междунар. форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, г. Донецк, 8-9 апреля 2021 г. / редкол.: Ю.Ф. Булгаков [и др.]. – Донецк: ДОННТУ, 2021. – С. 255-259.
10. Подвигин, К.А. Экономический эффект от внедрения установки локального охлаждения рудничного воздуха льдом / К.А. Подвигин // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 24-26 мая 2021 г. – Донецк: ДОННТУ, 2021. Т. 5: 5. Актуальные проблемы инновационного развития экономики Донбасса. – 2021. – С. 224-229.
11. Подвигин, К.А. Методика расчета параметров установки охлаждения воздуха в локальных рабочих зонах / К.А. Подвигин, Е.В. Курбацкий // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 24-26 мая 2021 г. – Донецк: ДОННТУ, 2021. Т. 1: 1. Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве. – 2021. – С. 98-102.
12. Подвигин, К.А. Анализ источников тепловыделения глубоких горизонтов угольных шахт / К.А. Подвигин // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 26-28 мая 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Т. 1: 1. Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве. – 2020. – С. 60-75.
13. Подвигин, К.А. Аналитическое исследование локального охлаждения воздуха льдом на опасных производственных объектах / К.А. Подвигин // Инновационные перспективы Донбасса, г. Донецк, 26-28 мая 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. Т. 1: 1. Проблемы и перспективы в горном деле и строительстве. – 2020. – С. 76-83.
14. Плаксиенко, О.В. Регулирование теплового режима в очистных забоях выемочных участков угольных шахт Донбасса / О.В. Плаксиенко, Р.А. Тишин, В.Д. Ашихмид, К.А. Подвигин, М.Ю. Маслова // Донбасс будущего глазами молодых ученых: сборник материалов научно-технической конференции, г. Донецк, 19 ноября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – С. 120-125.
15. 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.

#### Патенты на полезные модели и изобретения

16. Пат. 207609 Российская Федерация, RU (11) (51) МПК E21F 3/00 (). Устройство для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной выработки / К.А. Подвигин; заявитель и владелец К.А. Подвигин. – №2021123337; заявл. 02.08.2021; опубл. 03.11.2021, Бюл. № 31. – 7 с.