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

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,** ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ», заведующий кафедрой «Охрана труда и аэрология им. И.М. Пугача»

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита состоится «___» _____ 20__ года в ____ 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.org.

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

Автореферат разослан «___» _____20__ 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 45 °С, 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 28 – 35 °С, что значительно выше допустимых значений (согласно НПАОТ 10.0-1.01-16 не более 26 °С). С целью соблюдения требований охраны труда, для нормализации температурного режима, горнодобывающие предприятия применяют различные способы и технические средства охлаждения рудничного воздуха: 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. Системы кондиционирования применяют в горных выработках большой протяженности (очистные забои, подготовительные горные выработки и т.д.) и являются дорогостоящими и энергоемкими, поэтому 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 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 42 °С 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, опубликованным 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 горнорабочие, работающие при температуре воздуха 32 ℃ и выше, должны быть оснащены средствами индивидуальной защиты от теплового воздействия. Однако эти ограничения не распространяются на специальные работы, выполняемые в чрезвычайных ситуациях, при устранении опасностей для жизни или здоровья горнорабочих и устранении последствий аварий. Кроме того, средства индивидуальной противотепловой защиты сковывают движения горнорабочих, чем создают дополнительные неудобства в работе и как следствие практически не применяются.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиям микроклимата и нормализации его параметров при разработке месторождений полезных ископаемых посвящены работы: А.Н. Ягельского, Н.Н. Хохотвы, А.Н. Щербаня, В.А. Кузина, А.К. Яковенка, О.А. Кремнева, Г.А. Аверина, И.Р. Венгерова, Ю.Д. Дядькина, П.В. Участника, В.Я. Журавленка, А.В. Чернова, Ю.Ф. Булгакова, А.Ф. Бабалова, Л.А. Глушкова, С.В. Петрова, В.Н. Богословского, Н.Н. Брушлинского, М.Я. Ройтмана, Н.В. Малеева, А.Н. Мартынова, И.Ф. Марийчука и многих других. 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 работ, 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.

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 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 $t \leq 26$ °С 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 $t \leq 26$ °С, 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 является обоснование параметров охлажденного воздушного потока при нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки, исходя из допустимых параметров безопасности работы горнорабочих на рабочих местах, в условиях сложной техногенной обстановки.

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

Положения, выносимые на защиту:

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

2. Установлено, что зависимость температуры воздуха при охлаждении в локальной рабочей зоне от начальной температуры и скорости охлажденной струи воздуха, скорости и температуры спутного воздушного потока позволяет установить зону эффективного охлаждения локальной рабочей зоны до температуры $t \leq 26$ °С.

Научная новизна полученных результатов:

1. Впервые установлена экспоненциальная зависимость скорости фазового перехода льдосоляной смеси при охлаждении воздушного потока в пределах его начальных температур 30-32 °С, 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 установлена зависимость температуры воздуха при нормализации температурного режима в локальной рабочей зоне горной выработки по продольной оси охлажденной воздушной струи, путем решения известного уравнения теплопроводности Фурье, от скоростей охлажденной струи воздуха и спутного воздушного потока, а также их начальных температур.

3. Впервые 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.

Теоретическое значение полученных результатов состоит в развитии теоретических основ теплопоглощения льдосоляной смесью тепла из движущегося потока воздуха при протекании экзотермических 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. 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;

2. 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, физические и численные методы определения параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки; 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 «Техническое задание на установку для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне подземной горной выработки», разработанное в ГОУВПО «ДОННТУ» и согласованное с «МакНИИ» и с НИИГД «РЕСПИРАТОР».

Экспериментальный образец установки для охлаждения воздуха прошел опытно-промышленные испытания в учебной шахте Учебно-оперативного центра Оперативного ВГСО ГВГСС 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».

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

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

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 25% 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; выполнены экспериментальные исследования в лабораторных условиях и опытно-промышленные испытания экспериментального образца установки для охлаждения воздуха, 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 «Донбасс будущего глазами молодых ученых 2019», (г. Донецк); 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-горняков, 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, 6 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 237 страницах машинописного текста, в том числе 151 страниц основной части, содержит 31 рисунок, 16 таблиц, список использованных источников из 63 наименований на семи страницах и 7 приложений на 86 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 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. Вышеизложенное позволило 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 плавления льдосодержащих хладагентов достигается путем ввода соли в их состав. В настоящее время наиболее применимыми в холодильной технике являются смеси хлористого натрия со льдом. В зависимости от процентного содержания соли в рассоле, температуру плавления можно понизить до минус 20 ℃ и ниже (рисунок 1).

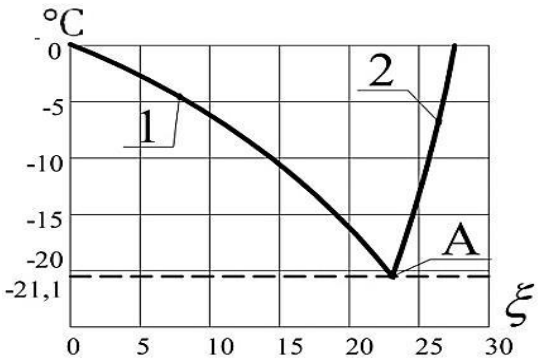

Рисунок 1 – Диаграмма изменения температуры плавления при увеличении концентрации NaCl в смеси: 1 – кривая выделения льда; 2 – кривая выделения соли; А – криогидратная точка.

Из рисунка 1 видно, что при повышении концентрации соли NaCl до 23% в льдосоляной смеси, температура плавления (кристаллизации) снижается до минус 21,1 °С.

Установлено, что расчет параметров системы охлаждения необходимо выполнять в зависимости от времени эффективного охлаждения воздуха. Поэтому рассмотрение всех процессов теплообмена необходимо начинать с изучения процесса фазового перехода, протекающего в ячейке аккумулятора холода. Так, каждую ячейку аккумулятора холода можно представить в виде цилиндра (рисунок 2).

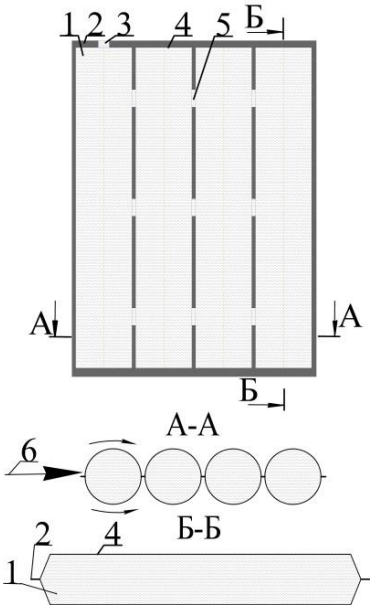

Рисунок 2 – Схема аккумулятора холода (вид сверху): 1 – льдосоляная смесь; 2 – сварной шов; 3 – заливное отверстие; 4 – ячейка аккумулятора холода; 5 – канал для прохода рассола; 6 – направление движения воздуха вдоль аккумулятора холода.

Температуру в аккумуляторе холода определяем, используя уравнение вида,

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

где θ – температура аккумулятора холода (льдосоляной смеси), К;

T_0 – температура охлаждаемого воздушного потока, К;

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

τ – время, с.;

x – продольная координата вдоль аккумулятора холода, м;

α – коэффициент температуропроводности аккумулятора холода, м^2/с.

Константу скорости плавления льдосоляной смеси в зависимости от температуры представим соотношением Аррениуса

$$k = Aexp(-E_A/RT_0), \qquad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель,1/с.;

E_A – энергия плавления льдосоляной смеси, Дж/моль;

R – газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(К·моль).

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

$$m = m_0 exp[-Aexp(-E_A\ /\ RT)\tau]. \qquad (3)$$

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

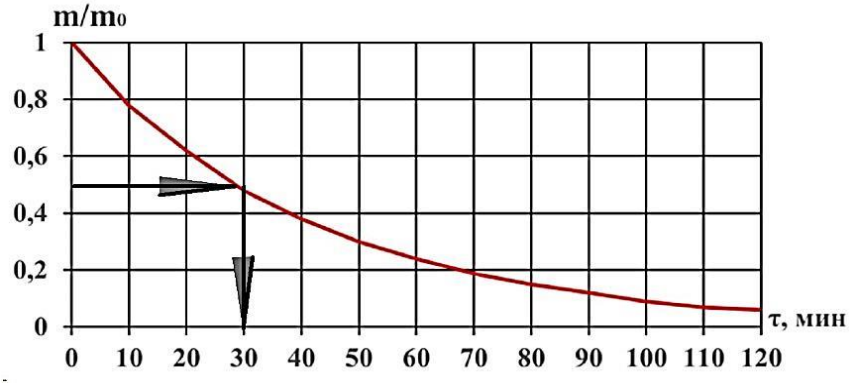

Рисунок 3 – Кривая фазового перехода льдосоляной смеси от времени с начала ее плавления

С целью обоснования параметров установки для охлаждения воздуха 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,

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = a\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + b(T - \theta), \qquad (4)$$

где T – температура охлаждаемого воздушного потока, К;

θ – температура аккумуляторов холода, К;

a_1 – коэффициент температуропроводности воздуха, м^2/с.;

a – коэффициент температуропроводности аккумуляторов холода, м^2/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 представлены в конечных разностях

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

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta \tau} = a\frac{\Delta^2 \theta}{\Delta x^2} + b(T - \theta), \qquad (5)$$

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

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

$$\theta_{m,n+1} = Fo\theta_{m-1,n} + (1 - 2Fo - \gamma)\theta_{m,n} + Fo\theta_{m+1,n} + \gamma T_{m,n}\,. \qquad (6)$$

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 4 представлено условное разбиение на отрезки по длине установки и по времени.

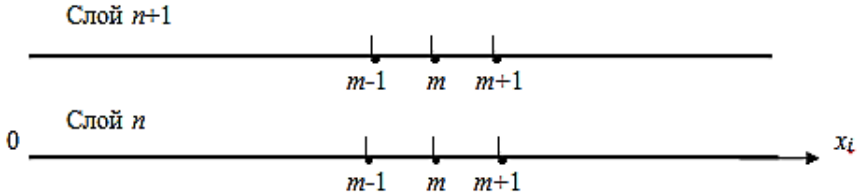

Рисунок 4 – Номера узлов по длине установки и по времени

На рисунке 5 приведена схема движения воздуха в установке для охлаждения воздуха.

Рисунок 5 – Схема движения воздушного потока в установке для охлаждения воздуха

При расчетах необходимо принимать на поворотах потока воздуха коэффициент теплообмена γ=0, так как в этих местах будут отсутствовать аккумуляторы холода.

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

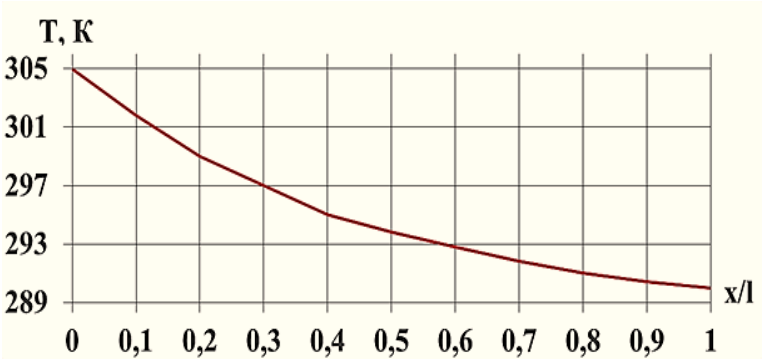

Рисунок 6 – Распределение температуры в установке охлаждения воздуха по ее длине.

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

$$Cu = 0{,}5;\ Fo = 0{,}1;\ \gamma = 0{,}3, \qquad (7)$$

воздух от температуры 305 К (32 °С) постепенно охлаждается до температуры 290 К (17 °С).

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 охлажденная воздушная 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_o – температура спутного воздушного потока, К;

T_1 – температура охлажденного воздуха, К;

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

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

x – дальнобойность охлажденной воздушной струи, м;

d – начальный диаметр охлажденной воздушной струи, м;

C – эмпирическая константа, 1.

Для определения дальнобойности охлажденной 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.;

τ – время движения охлажденной струи воздуха, с.

Для определения максимальной площади поперечного сечения струи охлажденного воздуха используем уравнение

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

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

G – расход струи охлажденного воздуха на один квадратный метр, кг/(с·м^2);

ρ – плотность охлажденного воздуха, кг/м^3;

l – длина охлажденной воздушной струи до распада, м.

В третьем разделе представлены результаты экспериментальных исследований по изучению реального процесса теплообмена между воздушным потоком и льдосоляными аккумуляторами холода, на основе планирования экспериментальных исследований, аргументированной методики и обработки данных исследований.

Экспериментальные исследования характеризуют реальный процесс охлаждения воздуха посредством контакта с аккумуляторами холода, воспроизводимый на специальной экспериментальной установке, схема которой представлена на рисунке 7.

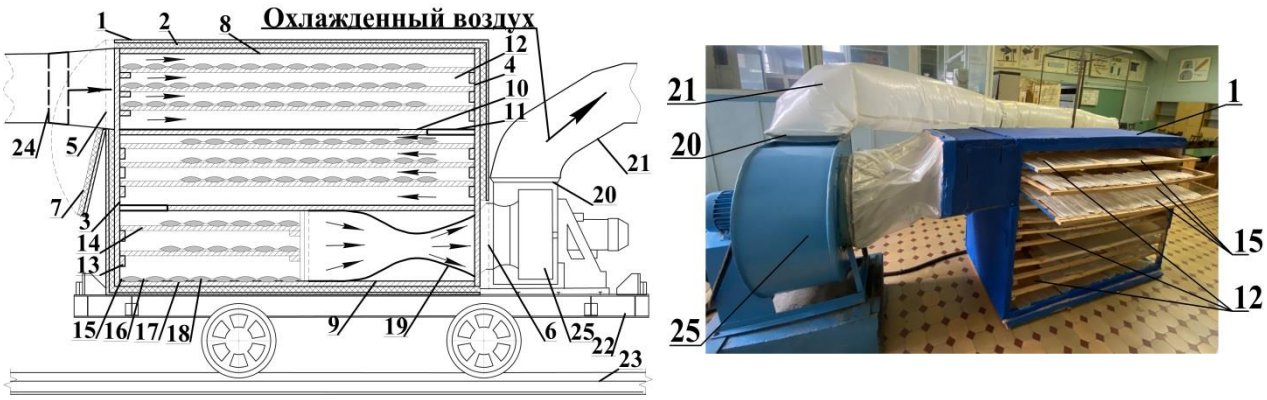

Рисунок 7 – Схема установки для охлаждения воздуха (расшифровка обозначений приведена в тексте)

Для подготовки установки к работе вручную 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 21. Кожух вентилятора 25, для исключения дополнительного нагревания 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 стенки 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 воздухонепроницаемых 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.

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 планирования эксперимента. При определении оценок использовано распределение Стьюдента.

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 методики расчета параметров установки для охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.

Для установления зависимости времени защитного действия от количества аккумуляторов холода помещенных в теплообменные камеры установки проведена серия лабораторных испытаний. Испытания установки проводились с 50; 75; 100% загрузкой теплообменных камер аккумуляторами холода (рисунок 8). В теплообменных камерах установки при 100% загрузке размещается 500 аккумуляторов холода (один аккумулятор холода содержит 180 грамм льдосоляной смеси).

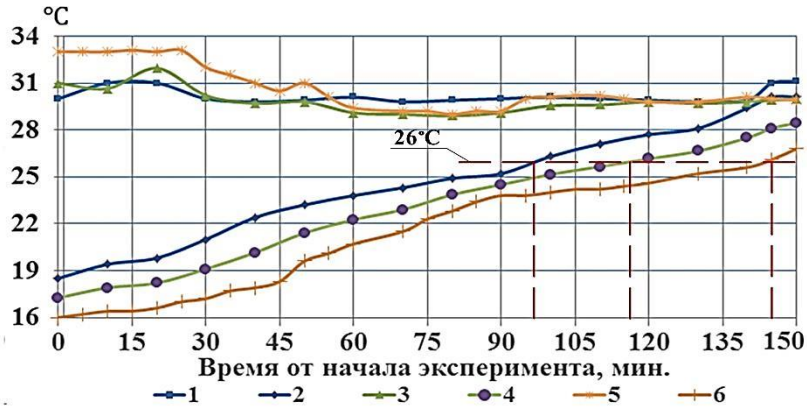

Рисунок 8 – Зависимость длительности рабочего цикла установки от количества аккумуляторов холода помещенных в ее теплообменные камеры: 1 – температура воздуха на входе в установку (при 50% загрузке); 2 – температура воздуха исходящего из установки (при 50% загрузке); 3 – температура воздуха на входе 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).

Схема проведения экспериментальных испытаний установки для охлаждения воздуха показана на рисунке 9.

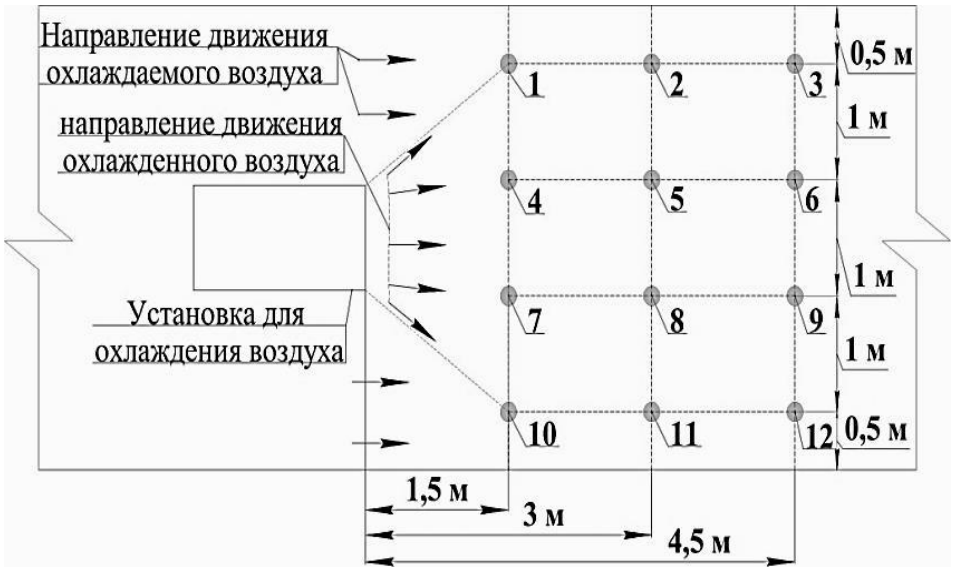

Рисунок 9 – Схема проведения экспериментальных исследований установки для охлаждения воздуха (вид сверху): 1-12 – точки замера параметров воздуха на замерных станциях в ходе эксперимента.

Данные, полученные в ходе испытаний представлены на рисунках 12,13,14,15.

Для определения ширины рабочей зоны где обеспечивалась температура $t \leq 26$ °C была выполнена линейная интерполяция значений температуры воздуха между точками: 1-4; 2-5; 3-6; 7-10; 8-11; 9-12 (рисунок 9). Данные полученные в результате линейной интерполяции приведены в виде графика (рисунок 10) по длине и ширине охлаждаемой зоны.

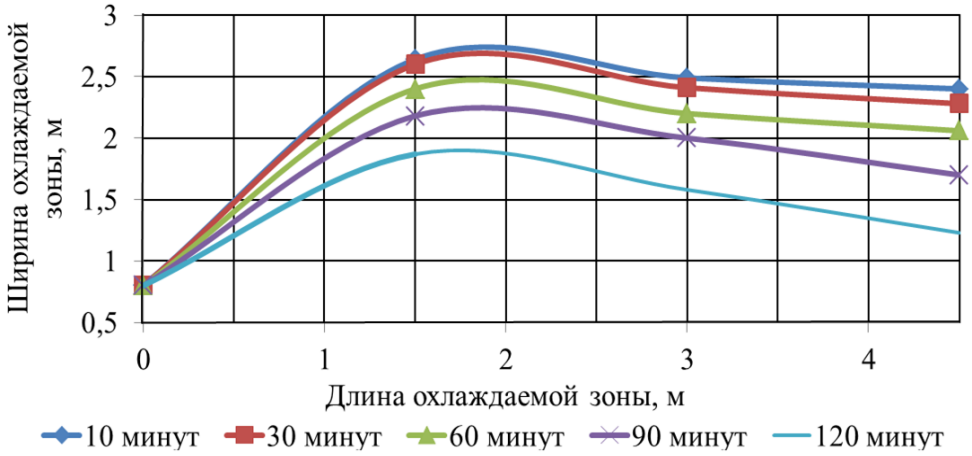

Рисунок 10 – График зависимости ширины охлаждаемой зоны от времени, прошедшего с начала работы установки и от удаления от нее

Согласно результатам сравнения данных теории и экспериментальных испытаний (рисунок 11) наилучшего приближения между ними можно достичь при коэффициенте теплообмена b = 0,1 1/с.

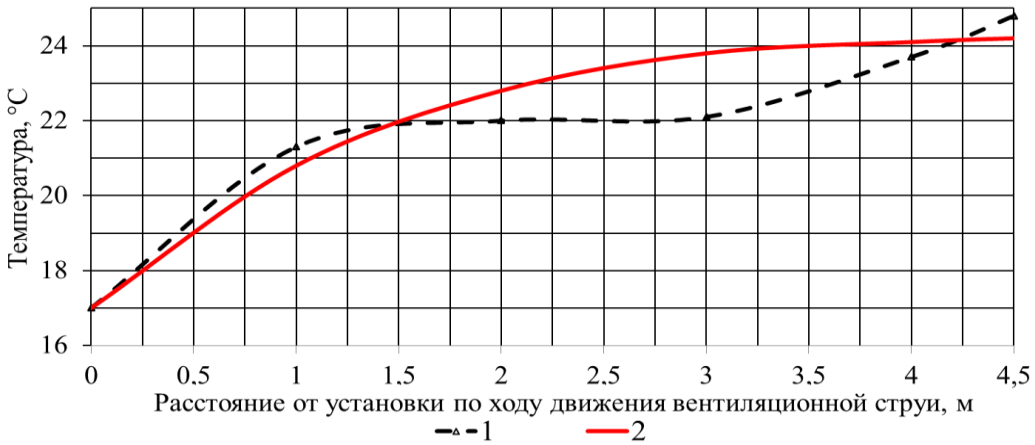

Рисунок 11 – График изменения температуры воздуха по длине охлаждаемой зоны (10 минут с начала работы установки):
1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные данные.

Сравнение данных теории и эксперимента показали, что среднеквадратическая ошибка расчетных данных не превышает 25%.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать технические требования, предъявляемые к установке и обосновать параметры способа охлаждения воздуха в локальной рабочей зоне горной выработки.

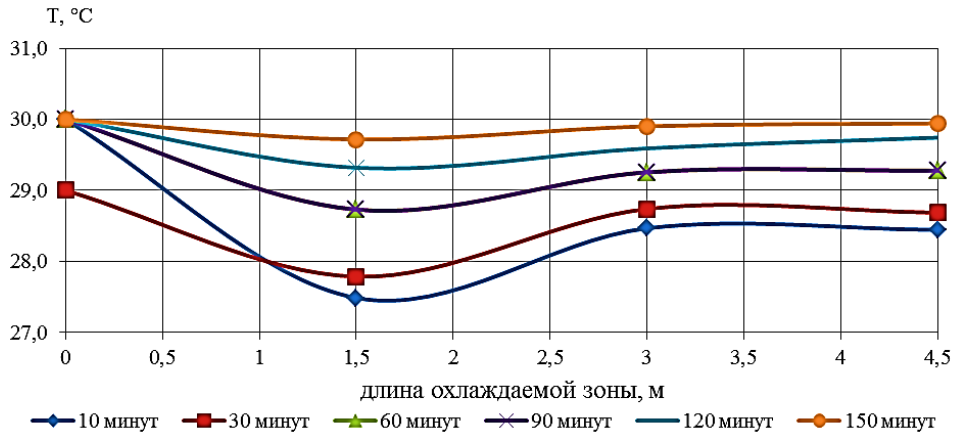

Рисунок 12 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 1,2,3

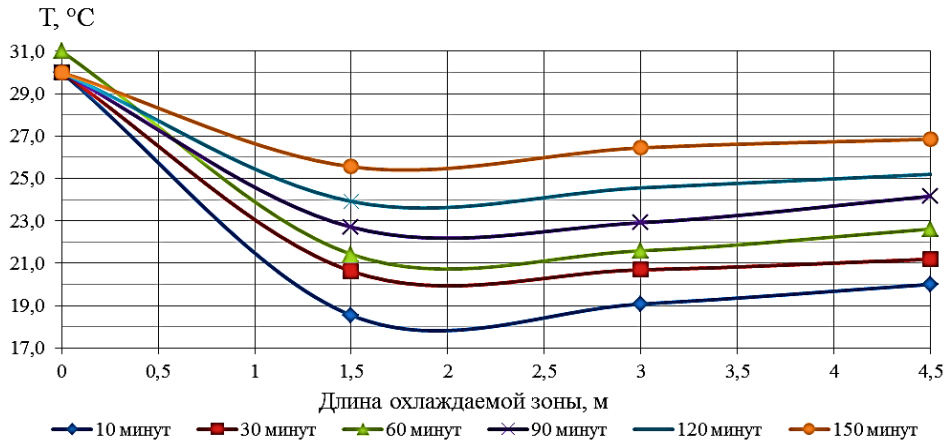

Рисунок 13 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 4,5,6

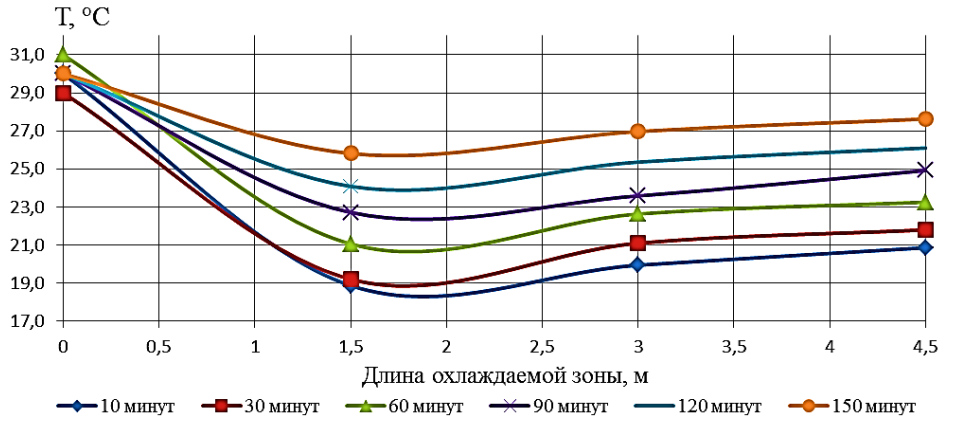

Рисунок 14 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 7,8,9

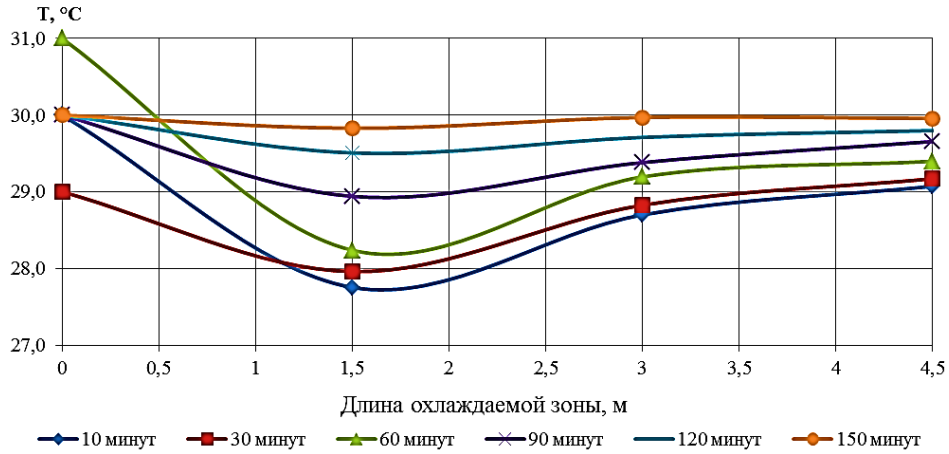

Рисунок 15 – Изменение температуры по длине охлаждаемой зоны в точках 10,11,12

В четвертом разделе разработаны тактико-технические рекомендации по применению установки для охлаждения воздуха.

Для более существенного снижения температуры рудничного воздуха в теплообменных камерах установки, можно использовать хладагенты (льдосоляную смесь) с различной массовой долей соли, что позволит снизить температуру кристаллизации (плавления), а также варьировать количество аккумуляторов холода, размещенных в установке.

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 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, °С, при относительной влажности, %		
	75% и меньше	76-90%	более 90%
До 0,25	24	23	22
0,26-0,50	25	24	23
0,51-1,00	26	25	24
1,01 и более	26	26	26

На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований получена техническая характеристика установки (таблица 2).

Таблица 2 – Основные технические требования к установке охлаждения воздуха

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура воздуха на выходе (10-150 мин.),°С при температуре рудничного воздуха на входе 32 – 33 °С, расход воздуха 0,5 $м^3$/с, температура аккумуляторов холода (начальная) минус 18 °С	17-26
2	Скорость движения воздуха на выходе, м/с	4
3	Время подготовки к работе, мин.	15
4	Масса, не более (без вентилятора), кг	130
5	Габаритные размеры (без вентилятора), м, не более: ширина/длина/высота	1,1/2,0/1,3

При использовании в качестве хладагента льдосоляной смеси с массовой долей NaCl 0,2 температура кристаллизации снизилась до температуры минус 18 °С, что обеспечило на выходе из установки минимально допустимую температуру воздуха при максимально допустимой его скорости. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования обоснованного способа охлаждения воздуха, позволили определить размеры охлаждаемой зоны и время эффективной работы установки охлаждения воздуха (таблица 3).

Таблица 3 – Ширина охлаждаемой зоны при удалении от установки, в которой обеспечивалась температура $t \leq 26$ °С

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	-	-

Установка может быть эффективно использована:

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

2) в технологических зонах расположения высокоэнергетических силовых агрегатов, создающих значительные техногенные тепловые потоки;

3) при устранении последствий аварии или инцидента (стыковка конвейерной ленты, ремонт приводной станции конвейера и т.д.);

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

Охлаждаемый воздух должен соответствовать требованиям (таблица 4).

Таблица 4 – Основные требования к охлаждаемому воздуху

№ п/п	Наименование показателей	Значение
1	Температура, °С	до 32
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 горной выработке, м/с	от 0,2 до 2

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 26 °С).

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 28-35 °С, что приводит к тепловому удару горнорабочих, поэтому предложена нормализация температуры воздуха в локальной рабочей зоне с

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.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях ВАК Минобрнауки ДНР:

1. Подвигин, К.А. Процессы теплообмена воздушной струи при контакте с нетающим 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.