

На правах рукописи

Серенов Иван Иванович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАМОРАЖИВАНИЯ ПРИ
СОЗДАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ХЛАДОЕМКОЙ МАССЫ ВОДНОГО
ЛЬДА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО
ПОТЕНЦИАЛА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Специальность 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в московском государственном политехническом университете на кафедре «Техники низких температур» им. П.Л. Капицы.

Научный руководитель: **Маринюк Борис Тимофеевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лавров Николай Алексеевич** доктор технических наук, профессор кафедры «Холодильная, криогенная техника системы кондиционирования и жизнеобеспечения», ФГБОУ ВО МГТУ им. Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)
Камзолов Сергей Михайлович кандидат технических наук, доцент. Менеджер по продажам компрессоров Dorin в России и странах СНГ ООО «СМАРТ»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота», кафедра «Холодильная, криогенная техника и системы жизнеобеспечения» г. Калининград.

Защита диссертации состоится « 14 » декабря 2016 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская набережная, д. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

С текстом диссертации можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru

Телефон для справок 8(499)267-09-63

Автореферат разослан «__» _____ 201 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета, Д212.141.16
к.т.н., доцент

Колосов М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Возрастание проблем влияния техногенного фактора на окружающую среду и рост стоимости электроэнергии понуждают к поиску мер по энергосбережению и защите окружающей среды. Использование возобновляемых источников энергии, к которым относятся ресурсы отрицательных температур окружающей среды, позволяют снизить расходы электроэнергии в действующих установках холодильной системы. Все это находится в русле принятого ФЗ №261 от 23.11.2009 (ред. от 03.07.2016) «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Климатические условия России обладают существенными запасами холода в виде атмосферного воздуха с отрицательными температурами, которые наблюдаются в осенне-зимний период года. Природный холод можно успешно использовать для целей аккумуляции льда с дальнейшим применением для охлаждения воды до околонулевых температур.

Рост цен на энергоносители, в том числе на электроэнергию, носит объективный характер, так как стоимость добычи ископаемых энергоносителей как и затраты на транспортировку их к местам потребления возрастают.

В статье «Актуальные направления развития техники низких температур», говоря о нарастании дефицита энергии в 21 веке, проф. д.т.н. Калнинь И.М. прогнозировал возрастание использования естественного холода наружного воздуха для аккумуляции водного льда. В этой связи принятое научное направление исследования является актуальной задачей.

Целью работы является создание эффективных устройств холодоаккумуляции на основе процесса замораживания воды в различных формах с использованием низкого потенциала отрицательных температур окружающей среды.

Задачи исследования:

1. Разработка расчетно-аналитического описания процесса замораживания воды в различных ее формах.
2. Получение экспериментальных данных в условиях эксплуатационных режимов на опытном стенде холодоаккумуляционной установки.
3. Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчета по составленной математической модели.

4. Создание конструктивной схемы холодоаккумуляционной установки способной вести накопление льда при слабоотрицательных температурах окружающего воздуха.

5. Создание методики расчетного проектирования холодоаккумуляционной установки.

Научная новизна:

1. Созданы математические модели замораживания водной среды в различных ее геометрических формах (плоско-параллельный слой и сфера).

2. Получены аналитические зависимости, определяющие динамику замораживания водного льда в различных его формах.

3. Выявлены параметры определяющие скорость развития процесса промораживания.

Положения, выносимые на защиту:

1. Метод расчета динамики намораживания льда в различных геометрических формах на основе информационного подхода.

2. Результаты расчетного исследования процесса замораживания водного льда.

3. Результаты экспериментальных исследований на моделях и опытной холодоаккумуляционной установки.

Личный вклад соискателя:

Участие в постановке задачи моделирования процесса замораживания различных форм воды в потоке холодного воздуха. Расчеты по математическим моделям. Создание стендов для проведения опытов. Сопоставление результатов расчетов с опытными данными, полученными на стендах.

Достоверность полученных автором результатов

Достоверность полученных автором данных подтверждается применением сертифицированных измерительных приборов, использованием проверенных способов измерения параметров и методик проведения экспериментов. Все полученные данные могут быть повторно воспроизведены в результате эксперимента.

Практическая значимость

Предложены конструктивные схемы холодоаккумуляционных установок, позволяющих работать при слабых потенциалах отрицательных температур окружающего воздуха, начиная с минус 1,5°C и ниже, такие схемы обладают признаками оригинальности, подана заявка в Роспатент на предполагаемое изобретение.

Разработана методика расчетного проектирования холодоаккумуляционной установки. Полученные обобщения позволяют вести анализ влияния характеристик процесса на развитие динамики замораживания

слоев водного льда. Представленные результаты могут быть использованы для расчетов времени экспозиции при замораживании водонасыщенных лесных ягод перед закладкой их в морозильную камеру для длительного сохранения.

Решение задачи замораживания плоско-параллельного слоя воды позволяет рассчитать производительность льдогенератора, использующего потенциал отрицательных температур окружающего воздуха для создания холодоаккумуляционной массы водного льда при его закладке зимой в льдобунтах для хранения и использования летом. Полученное обобщение может быть так же использовано для определения несущей способности слоя льда на водоемах в предзимний период, что важно при организации переправ и зимников, для движения людей и транспорта.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» 14-16 декабря 2011 г., 10-12 декабря 2013 г. (Москва); Научно-практической конференции посвященной Л.А. Костандова, ноябрь 2014, ноябрь 2015 (Москва), Университет Машиностроения; Научно-практическая конференция «Развитие индустрии холода на современном этапе» 2-3 марта 2016г., (Москва, 2016).

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 8 научных работах, в том числе в реферируемых журналах ВАК.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка сокращений и списка литературы. Работа содержит 101 страницу машинописного текста, 46 рисунков, 5 таблиц, список литературы из 81 наименования.

Специальность, которой соответствует диссертация

Согласно сформулированной цели научной работы, ее научной новизне, установленной практической значимости, диссертация соответствует паспорту специальности 05.04.03 – Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, пункту 2 «Теоретические и экспериментальные исследования процессов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью углубления оценки проявляющихся в них физических закономерностей, создания надежных алгоритмов управления и прогноза»; пункту 4 «Развитие и реализация энергосберегающих технологий при создании машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи выполненных исследований, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе «Использование потенциала отрицательных температур окружающей среды в системах холодильной техники для холодоаккумуляции льда и охлаждения воды» приведен обзор научных исследований по использованию природного холода в холодильной технике для холодоаккумуляции. Приведены конструкции устройств, дана их классификация, основные характеристики холодильных машин, работающих с применением холодного воздуха. Выявлены достоинства и недостатки существующих конструкций.

Представлен анализ литературных данных, посвященных замораживанию слоев водного льда и устройств, исследующих этот процесс. Большой вклад в решение этой задачи в нашей стране внесли следующие исследователи С.С. Ковнер, Д. Нейман, Б. Стефан, Л.С. Лейбензон, Н.А. Лавров, Б.А. Савельев, Т.Н. Громова, А.М. Вайнберг, С.Б. Балкарова, Лобанов Ю.А., Бабакин Б.С., Зейгарник Ю.А., М.Б. Генералов, Л.Г. Качурин, В.В. Степанов, М.К. Жекалухов, А.В. Сосновский, В.Ф. Федосеев, А.З. Волюнец, С.В. Белуков, Э.И. Гуйго.

Среди зарубежных авторов следует отметить вклад таких ученых, как работы Р.И. Педросо, Г.А. Домото, Ю.П. Чин, Т.С. Чой, Реймонд, Рубинский, Т.В. Радраанабхан, Р.К. Собба, А.Л. Мак-Кенозе, Д.А. Тазия, С.В. Турнер.

На основе проведенного анализа определены основные задачи исследования и цель работы.

Во второй главе приведен вывод математических моделей по замораживанию сферической капли воды, плоско-параллельного слоя в потоке холодного воздуха и оттаиванию ледяной сферы.

Расчетная модель промерзания сферического слоя была выведена на основе решения нестационарного уравнения теплопроводности Фурье (информационный подход).

Обозначим радиусом R геометрический размер капли, температуру воздуха считаем постоянной и равной T_b .

Примем сферическую систему координат с началом отсчета в центре капли (Рисунок 1). Обозначим символом η координату фронта фазового превращения. Толщина слоя водного льда в капле ξ меняется со временем τ . Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности сферы α_b постоянен.

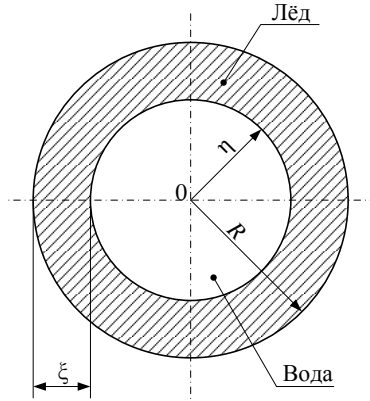


Рисунок 1. Схема термического взаимодействия сферической капли воды, находящейся в охлаждающей среде с отрицательной температурой

Нестационарное дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье для шарового слоя имеет вид:

$$\frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r}, \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности для льда с околонулевой температурой. Принимаем $a = 1,163 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$.

Краевые условия примут вид:

$$T(R, \tau) = T_n, \quad (2)$$

где T – температура поверхности капельной сферы T_n , которая меняется со временем.

$$T(r, 0) = T_w = T_\phi \quad (3)$$

$$T(\eta, \tau) = 273 \text{ K} \quad (4)$$

Тепловое условие на границе лед – вода:

$$\lambda \cdot \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=\eta} = \rho \cdot L \cdot \frac{d\eta}{d\tau}, \quad (5)$$

Примем к уравнению (1) подстановку:

$$T(r, \tau) = T(v), \quad (6)$$

где v – обобщающая переменная, $v = \frac{r-\eta}{\sqrt{\tau}}$.

Соответственно при $r = R$; значение v примем:

$$\beta = \frac{R - \eta}{\sqrt{\tau}} \quad (7)$$

В этом случае уравнение (5) можно записать в полных производных параметра температуры $T(v)$, а решение его представить в виде ряда:

$$T(v) = T_{\text{ст}} + T'_{v=\beta} \cdot \frac{v - \beta}{1!} + T''_{v=\beta} \cdot \left(\frac{v - \beta}{2!}\right)^2 + \dots \quad (8)$$

Выражение для $T_{\text{ст}}$ получается с использованием гипотезы проф. Лейбензона Л.С. о стационарном распределении температур в сферическом слое льда. С учетом этого, выполняя соответствующие преобразования с рядом решения (8), приходим к окончательному результату, окружающему динамику замораживания сферической формы воды:

$$T_{\phi} = \frac{\frac{\alpha_v R T_v}{\lambda \eta} + \frac{T_{\phi}}{R - \eta}}{\frac{1}{R - \eta} + \frac{\alpha_v R}{\lambda \eta}} + \frac{\rho L \cdot \left(\frac{R - \eta}{\sqrt{\tau}}\right)^2}{2\lambda} + \frac{\rho L \cdot \left(\frac{R - \eta}{\sqrt{\tau}}\right)^3}{4\lambda} \cdot \left(\frac{2\sqrt{\tau}}{\eta}\right) \quad (9)$$

Расчетная модель замораживания плоско-параллельного слоя с использованием холодного воздуха атмосферы.

Интерес представляет расчетным путем определить время τ образования плоского слоя толщиной ξ_d .

Рассмотрим случай замерзания поверхности воды соприкасающейся с воздухом, имеющим отрицательную температуру. Масса воды достаточно большая и ее температура T_w не меняется со временем.

Теплопритоком со дна ложа бассейна пренебрегаем. Схема теплового воздействия представлена на Рисунке 2.

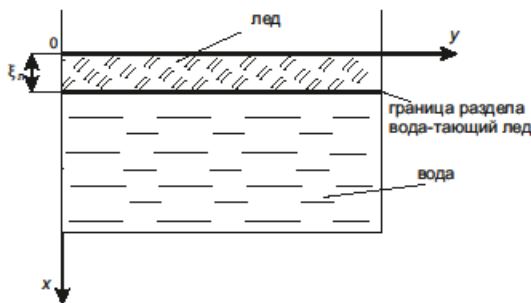


Рисунок 2. Схема теплового воздействия на плоско-параллельный слой водной поверхности

Примем прямолинейное распределение температур в слое образующегося водного льда ξ_l :

$$T(x, \tau) = T_0 + \frac{T_\phi - T_0}{\xi_l} * x, \quad (10)$$

где x – координата; T_0 – температура поверхности льда, обращенная к среде воздуха, К; τ – время процесса, с; T_ϕ – температура фазового перехода воды в лед, $T_\phi = 273\text{К}$; ξ_l – толщина слоя льда, м.

Граничное условие со стороны воздуха имеет вид:

$$\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = \alpha_b (T_0 - T_b), \quad (11)$$

где λ – коэффициент теплопроводности льда при температуре фазового перехода, $\lambda = 2,3\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; α_b – коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности воды (льда), $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, T_b – температура воздуха окружающей среды, К.

Производя дифференцирование уравнение (10) по координате x и подставляя результат в условия (11) получим значение температуры на поверхности льда, обращенной в среду воздуха:

$$T_0 = \frac{\lambda T_\phi / \xi_l + \alpha_b T_b}{\alpha_b + \lambda / \xi_l} \quad (12)$$

Следуя принципам информационного подхода, для решения задачи привлекаем информацию более высокого ранга, чем граничное условие (11) в виде готового выражения для роста толщины слоя льда на охлаждаемой изотермической поверхности плоской стенки.

Подставляя выражение (12) в известное решения для плоской стенки, получаем результат:

$$\xi_l = -\frac{\alpha_w (T_w - T_\phi) \tau}{\rho L} + \frac{\lambda}{\rho L} \sqrt{\left[\frac{\alpha_w (T_w - T_\phi) \tau}{\lambda} \right]^2 - \frac{2\rho L}{\lambda} \left(\frac{\lambda T_\phi}{\xi_l} + \alpha_b T_b - 273 \right) \tau} \quad (13)$$

где α_w – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности льда, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, T_w – температура воды, К; L – теплота фазового перехода воды в лед, $L = 334\text{кДж}/\text{кг}$; ρ_l – плотность льда, $\rho_l = 917\text{кг}/\text{м}^3$.

Уравнение (13) представляет в неявном виде зависимость глубины промерзания воды ξ_l от времени и параметров процесса.

Расчетная модель оттаивания сферы. Дифференциальное уравнение теплового баланса имеет вид (14). Уравнение (15) связывает

среднюю температуру воды омывающей сферу со льдом и температуру фазового перехода согласно уравнению стационарного теплообмена. Оба уравнения решаются совместно. В итоге получаем время таяния сферы слоя толщиной δ .

$$G_w C_{pw} (T_w^H - T_w) = \pi (2R - \delta)^2 \frac{d\delta}{d\tau} \rho L, \quad (14)$$

$$T_\phi = \overline{T_w} - \frac{Q}{F \alpha_w} = \frac{T_w^H + T_w}{2} - \frac{G_w C_{pw} (T_w^H - T_w)}{\pi (2R - \delta)^2 \alpha_w}, \quad (15)$$

где G_w – расход воды, кг/с; C_{pw} – теплоемкость воды, $C_{pw} = 4187$ Дж/(кг·К); T_w^H – начальная температура воды, К; T_w – конечная температура воды, К; R – радиус ледяной сферы, м; δ – толщина размороженного слоя, м; ρ – плотность льда, $\rho = 917$ кг/м³; L – теплота плавления льда, $L = 334$ кДж/кг; ; T_ϕ – температура фазового перехода вода-лед, $T_\phi = 273$ К; $\overline{T_w}$ – средняя температура воды, К; Q – тепловая нагрузка, Дж; F – площадь тающей сферы, м²; α_w – теплоотдача от воды, Вт/(м²·К).

$$\tau = \frac{\pi \rho L}{G_w C_{pw}} \int_0^\delta \frac{(2R - \delta)^2}{\left(T_w^H - \frac{2T_\phi - T_w^H + \frac{2G_w C_{pw} T_w^H}{\alpha_w F}}{1 + \frac{2G_w C_{pw}}{\alpha_w F}} \right)} d\delta, \quad (16)$$

где τ – время оттаивания заданного слоя, с.

Из уравнения (15):

$$T_w^K = \frac{2T_\phi - T_w^H + \frac{2G_w C_{pw} T_w^H}{\alpha_w F}}{1 + \frac{2G_w C_{pw}}{\alpha_w F}} \quad (17)$$

В третьей главе описывается ряд экспериментальных установок и методика проведения испытаний. Дается оценка погрешности измерительных приборов.

Схема испытательного стенда холодоаккумуляционной градирни представлен на Рисунке 3.

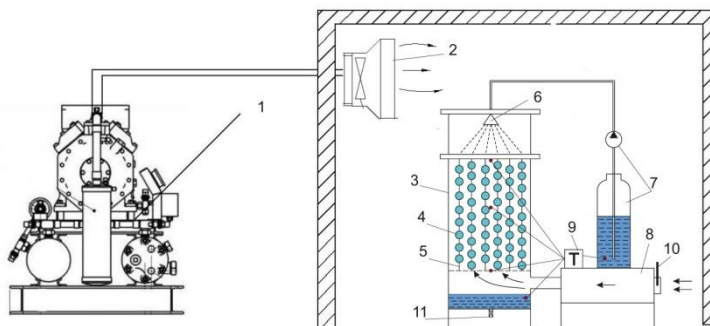


Рисунок 3. Схема испытательного стенда холодоаккумуляционной градирни: 1 – компрессорно-конденсаторный агрегат; 2 – воздухоохладитель; 3 – холодоаккумулятор; 4 – холодоаккумуляционная насадка; 5 – не теплопроводная нить; 6 – форсунка; 7 – пневматический опрыскиватель; 8 – вентилятор; 9 – устройство измерения температур; 10 – задвижка; 11 – сливной вентиль

Установка состоит из холодоаккумулятора 3, представляющий собой цилиндр из оргстекла с внутренним диаметром 200 мм и высотой 700 мм, в котором на нитях с низкой теплопроводностью материала 5 располагаются насадки сферической формы 4 диаметром 20 мм, выполненные из гидрофильной волокнистой структуры. В нижней боковой части градирни предусмотрено окно, к которому присоединяется через воздуховод радиальный электровентилятор 8. Он оснащен задвижкой 10, для регулирования расхода воздуха. В верхней части градирни установлена центробежная форсунка 6, к которой подводится вода из пневматического опрыскивателя 7. Вся установка расположена в холодильной камере оснащенной компрессорно-конденсаторным агрегатом 1, для создания отрицательной температуры и последующего забора холодного воздуха электровентилятором.

Для исследования процесса замораживания холодоаккумуляционной насадки и проверки адекватности математической модели, витающей в потоке воздуха была изготовлена экспериментальная установка (Рисунок 4)

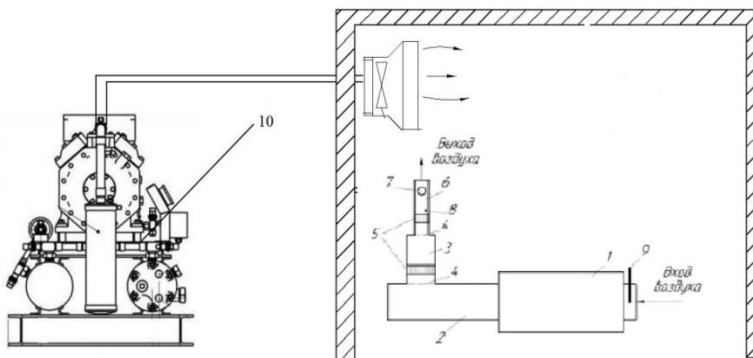


Рисунок 4. Схема экспериментальной установки: 1 – вентилятор; 2 – камера стабилизации; 3 – сопло; 4 – сетка; 5 – ячеистая перегородка; 6 – рабочий канал; 7 – опытный элемент; 8 – термопарный датчик температур; 9 – задвижка; 10 – компрессорно - конденсаторный агрегат

Для имитации сферической формы воды различных размеров приняли гидрофильную волокнистую структуру сферической формы.

На опытной установке по Рисунку 5 были проделаны опыты и получены данные по росту толщины намораживаемого слоя льда на поверхности водного бассейна.

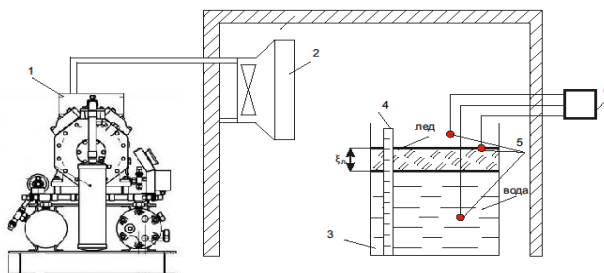


Рисунок 5. Экспериментальная установка: 1 - Компрессорно-конденсаторный агрегат; 2- Воздухоохладитель; 3 - Бак с охлаждённой водой; 4 - Измерительная шкала; 5- Термопары; 6 - Электронный термометр.

Опыты по оттаиванию ледяной сферы проводили на вспомогательном стенде.

Четвертая глава посвящена сопоставлению экспериментальных и расчетных данных.

На Рисунке 6 дано сопоставление результатов расчетов по разработанной математической модели уравнения (9) и данных из опытов по росту толщины слоев водного льда сферической формы.

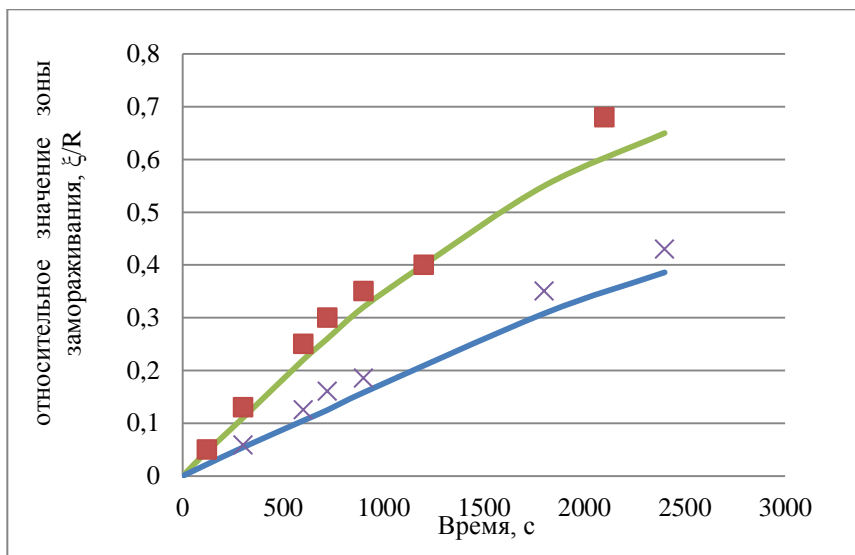


Рисунок 6. Зависимость относительной толщины (ξ/R) промерзания модели капли от времени (τ). Исходные данные: $d = 20 \pm 0.2$ мм, $T = 263 \pm 0.2$ К, $V = 12 \pm 0.2$ м/с; $d = 20 \pm 0.2$ мм, $T = 268 \pm 0.2$ К, $V = 12 \pm 0.2$ м/с

На Рисунке 7 дано сопоставление результатов расчетов по разработанной математической модели уравнения (13) и данных из опытов по промораживанию плоско-параллельных слоев воды.

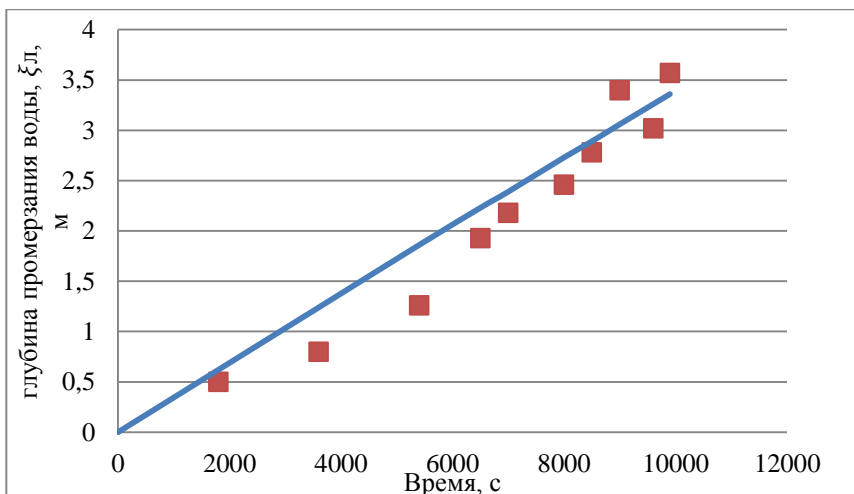


Рисунок 7. Зависимость глубины промерзания воды $\xi_{\text{л}}$ от времени τ . Опытные данные: $T_{\text{в}}=264\pm0,2$ К, $T_{\text{w}}=273,6\pm0,1$ К, $\alpha_{\text{w}}=90\pm3$ Вт/(м²·К), $\alpha_{\text{в}}=12\pm2$ Вт/(м²·К)

На Рисунке 8 дано сопоставление расчетных и опытных результатов по толщине оттаивания сферических слоев льда.

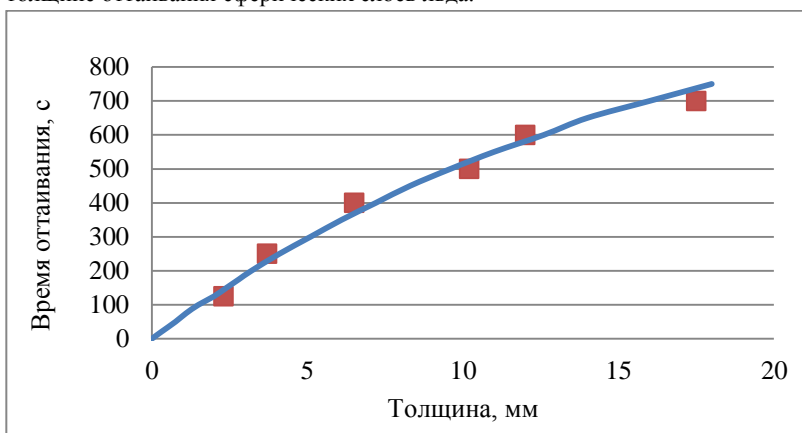


Рисунок 8. Зависимость толщины слоев оттаивания ледяной сферы от времени. Исходные данные: $D_{\text{с}} = 0,036\pm0,001$ м $T_{\text{w}}^{\text{н}}=284\pm0,1$ К; $G = 0,0004$ кг/с

На Рисунке 9 представлены расчеты, влияние коэффициента теплоотдачи на скорость замораживания сферической формы воды.

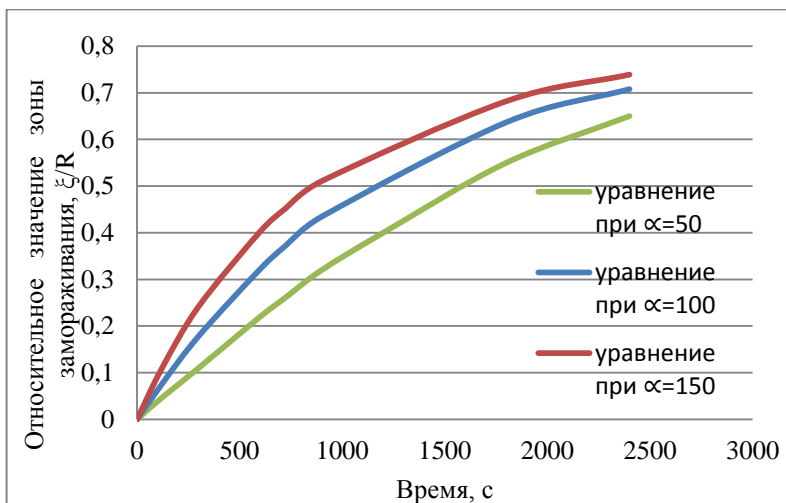


Рисунок 9 Зависимость относительной толщины промерзания сферы от времени при разных значениях коэффициента теплоотдачи: Исходные данные: $d = 0,02 \pm 0,001$ м; $T_v = 263 \pm 0,1$ К; $\alpha_{в1} = 50$ Вт/(м²·К), $\alpha_{в2} = 100$ Вт/(м²·К), $\alpha_{в3} = 150$ Вт/(м²·К)

В пятой главе представлены макетные образцы холодоаккумуляционных устройств, описание, методика и примеры расчетов.

Задача, решаемая в представленной разработке, направлена на создание экономически и технологически эффективных холодоаккумуляционных устройств, обеспечивающей процесс холодоаккумуляции за счет замораживания воды в сферической насадке и плоско-параллельном слое, с возможностью использования слабо отрицательных температур воздуха (от минус 1.5°C и ниже).

Холодоаккумуляционная градирня (Рисунок 10) содержит вентиляторный агрегат 1, расположенный в верхней части прямоугольного в поперечном сечении корпуса 2. В нижней части корпуса 2 по одной его стороне имеются два воздухоподводящих окна 3, через которые воздух попадает внутрь аппарата, где для его более равномерного распределения установлены воздухораспределители 4 изогнутой формы. В средней части корпуса 2

установлены, по меньшей мере, три оросительные насадки 5 и форсуночный распылитель 6 для подачи отепленной воды от потребителя. Емкость 7 в нижней части корпуса 2 предназначена для сбора охлажденной воды с отводом ее потребителю. Оросительная насадка представляет собой тела сферической формы 9 (это позволяет получить более высокое значение удельной поверхности), выполненные из волокнистого гидрофильного материала., которые предполагают многократные циклы использования, без потери свойств.

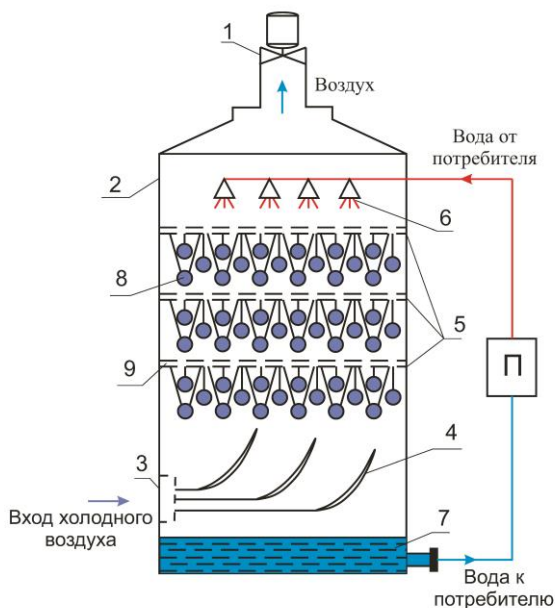


Рисунок 10 Конструктивная схема холодоаккумуляционной градирни

Холодоаккумуляционное устройство. В представленной работе дано описание конструктивной схемы холодоаккумуляционного устройства для заготовки льда в зимнее время с использованием потенциала отрицательных температур воздуха.

ВЫВОДЫ

1. Созданы математические модели процесса замораживания различных форм водной среды с использованием низкого потенциала отрицательных температур окружающего воздуха.

2. Выполнен поиск зависимостей по определению теплоотдачи сферической поверхности с подтверждением выбранной зависимости и на основе полученных экспериментальных данных.

3. Получены экспериментальные данные определяющие характеристики процесса замораживания водной среды различных геометрических форм.

4. Результаты сопоставления расчетных показателей полученных на основе математических моделей показали вполне удовлетворительное согласование с экспериментальными данными полученными на образцах и макетном варианте холодоаккумуляционной установки. Расхождение параметров времени замораживания не превысило 8%.

5. Подана заявка в Роспатент на предполагаемое изобретение “Холодоаккумуляционная градирня”.

6. Выявлен параметр впитываемости влаги в сферической насадке.

7. Разработана методика теплового конструктивного расчета холодоаккумуляционной установки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Серенов И.И., Духанина Е.В, Маринюк Б.Т. Замораживание капельной влаги в низкотемпературной среде // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур: Сб. тез. Конф. МГУИЭ. 2011. С. 27 – 28. (0.23 п.л./0.095 п.л.).

2. Использование потенциала отрицательных температур окружающего воздуха в холодоаккумуляционных установках / И.И. Серенов, А.С. Леонтьев, Б.Т. Маринюк // Инновационные разработки в области техники и физики низких температур: Сб. тез. Межд. Конф. – Москва: МГУИЭ, 10 – 12 декабря 2013. – С. 80 – 81.

3. Серенов И.И., Маринюк Б.Т., Спритнюк С.В. Теоретические и технические особенности процесса замораживания капельной влаги // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2014. №4. С.16 – 17. (0.23 п.л./ 0,097 п.л.).

4. Serenov I. I., Marinyuk B.T., Spritnyuk S. V. Theoretical and engineering features of the process of freezing of condensed moisture // Chemical and Petroleum Engineering. 2014. №4. P. 233-255. (0.23 p.l./ 0,097 p.l.).

5. Серенов И.И., Угольников М.А., Маринюк Б.Т. Использование потенциала отрицательных температур окружающего воздуха в холодоаккумуляционных установках // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. №1 (19). С.38-43. (0.46 п.л./ 0,185 п.л.).

6. Серенов И.И., Маринюк Б.Т. Технология замораживания водонасыщенных гранул сферической формы // Холодильная техника. 2015. №12. С. 56 – 58. (0.345 п.л. / 0.175 п.л.).
7. Серенов И.И., Маринюк Б.Т., Угольников М.А. Теплообмен в условиях намораживания льда на охлаждаемой поверхности пластинчатого прямого ребра в водной среде с постоянной температурой // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. №12. С. 24 – 25. (0.23 п.л./ 0,05 п.л.).