

На правах рукописи

Угольниковая Мария Андреевна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ
НАМОРАЖИВАНИИ ВОДНОГО ЛЬДА НА НЕИЗОЛИРОВАННЫХ
ЭЛЕМЕНТАХ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

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 – 2017

Работа выполнена в Московском политехническом университете

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Маринюк Борис Тимофеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Лавров Николай Алексеевич Московский
государственный технический университет им.
Н.Э. Баумана

кандидат технических наук, доцент, Иньков
Анатолий Павлович ООО «Экотерм»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Калининградский государственный
технический университет» «Балтийская
государственная академия рыбопромыслового
флота» ФГБОУ ВО «КГТУ» БГАРФ

Защита состоится « » октября 2017 года в на заседании Диссертационного
совета Д 212.141.16 в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва,
Лефортовская наб., д. 1, корпус «Энергомашиностроение».

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке МГТУ
им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по
указанному адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5. Ученому
секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан « » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

Колосов М.А.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Водный лед обладает особыми теплофизическими свойствами, он доступен, имеет относительно низкую стоимость, полностью совместим с окружающей средой, этим обусловлено его широкое применение в различных областях науки и техники. Растет применения водного льда в различных его формах и модификациях, в частности, как хладоноситель с постоянной температурой и меняющимся агрегатным состоянием он широко применяются в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, торговой отрасли, строительном деле и др. Существенным преимуществом применения водного льда для охлаждения продуктов, является отсутствие подмораживания, что в ряде случаев крайне важно. В связи с обширной областью применения, производство водного льда является важной технической задачей, в которую входит, в том числе расчет и проектирование ледогенераторов с различной формой рабочей поверхности намораживания.

Водный лед применяется так же в качестве холодоаккумуляционной массы, используемой в часы пиковых нагрузок. Причем лед может быть получен как с помощью холодильной установки (работающей в наиболее разгруженные для электросети часы), так и с применением естественного холода окружающей среды.

Важной экологической проблемой, ставшей последствием активной техногенной деятельности в XX веке, является удаление из водоемов затопленных оболочковых объектов. Такие предметы могут содержать токсичные, экологически опасные вещества, попадание которых в водную среду губительно для подводной флоры и фауны, а вместе с ними и для человека (через морепродукты). Это обуславливает необходимость подъема оболочковых объектов на поверхность водного бассейна для их последующей транспортировки и утилизации. Сложность данной задачи состоит в том, что стенки объектов зачастую подвержены значительному корзинному износу, исключаящему механическое воздействие на них, вследствие опасности разрушения. В таких условиях перспективными представляются низкотемпературные методы, основанные на применении водного льда для подъема затопленных объектов.

Задача расчета динамики намораживания водного льда на поверхностях различных форм является весьма актуальной для расчета и проектирования ледогенераторов и холодоаккумуляторов, а так же для создания систем извлечения затопленных объектов со дна водных бассейнов, с применением низкотемпературной технологии.

Цель работы

Создание и обоснование математического описания процессов работы устройств ледогенераторов, с различной формой поверхности намораживания, и устройств криозахвата оболочковых объектов с шельфа водных бассейнов.

Задачи исследования:

1. Разработка расчетно-аналитического метода определения скорости намораживания водного льда на поверхностях канонических форм (плоская стенка, внешняя и внутренняя цилиндрическая поверхность).
2. Оценка влияния зависимости теплофизических свойств льда от температуры, для случаев намораживания льда на плоской и наружной цилиндрической поверхностях.
3. Получение опытных данных по динамике роста толщины слоя водного льда на стенках, различных геометрических форм.
4. Сопоставление экспериментальных данных с теоретическими зависимостями, полученными по разработанным аналитическим моделям.
5. Создание конструктивной схемы устройства для подъема затопленных оболочковых объектов (криокуветы), на основе низкотемпературной технологии.
6. Создание методики расчета режимов работы устройства, для подъема оболочковых объектов (криокуветы).
7. Определение наиболее эффективной по способности накапливания льда рабочей поверхности намораживания.

Научная новизна

1. Разработан приближенный аналитический метод для расчета динамики намораживания льда на плоской стенке и цилиндрических поверхностях.
2. Получены аналитические зависимости, определяющие развитие процесса ледообразования на поверхностях намораживания ледогенераторов, холодоаккумуляторов и других элементах низкотемпературного оборудования, работающих в условиях водной среды, с учетом и без учета зависимости теплофизических свойств льда от температуры.
3. Выявлено влияние фактора времени развития процесса и тепловых параметров льда и воды на динамику роста слоя льда на охлаждаемых поверхностях.

Положения выносимые на защиту

1. Метод расчета динамики намораживания льда на охлаждаемых поверхностях канонических форм, погруженных в водную среду.
2. Результаты расчетного исследования процесса намораживания водного льда.

3. Результаты экспериментальных исследований намораживания водного льда на изотермической поверхности плоской стенки и цилиндрических поверхностях.

4. Конструктивная схема устройства криозахвата (криокуветы) для извлечения оболочковых объектов расположенных в водной среде.

Личный вклад соискателя

Участие в постановке задачи моделирования процессов теплообмена при намораживании водного льда на поверхностях канонических форм (плоская стенка, наружная и внутренняя цилиндрическая поверхность). Расчеты по математическим моделям. Создание стендов для получения экспериментальных данных и методики проведения опытов. Сопоставление теоретических результатов с опытными данными, полученными на стендах.

Достоверность полученных автором результатов

Полученные автором данные достоверны, что подтверждается использованием, проверенных способов измерения параметров и методик проведения опытов, а так же применением сертифицированных измерительных приборов. Все полученные в результате эксперимента данные могут быть повторно воспроизведены.

Практическая значимость

Разработана конструктивная схема устройств (криокуветы) для подъема и извлечения затопленных оболочковых объектов с водного шельфа. Представлена методика расчета режимов работы криокуветы для осуществления процесса смораживания рабочей поверхности устройства с оболочкой извлекаемого объекта.

Проведена оценка прочностных свойств льда на предмет возможностей работы, по подъему грузов с помощью криокуветы.

Предложен метод расчета и осуществлен выбор эффективной, по способности накапливания льда, поверхности намораживания, в различных конструкциях ледогенераторов.

Апробация работы

Основные положения и результаты исследования по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на III Международной конференции для молодежи с элементами научной школы: «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» 10–12 декабря 2013 г., (Москва, 2013); 63-ей Открытой студенческой научно-технической конференции СНТК Университета машиностроения 22 – 26 апреля 2013 г. (Москва 2013); Научно-практической конференции посвященной памяти Л.А. Костандова, ноябрь 2014, Университет Машиностроения, (Москва, 2014); Международной научно-практической конференции: «Новейшие технологии освоения месторождений

углеводородного сырья и обеспечение безопасности экосистем каспийского шельфа» 7 Сентября 2015г., (Астрахань 2015); Научно-практической конференции посвященной памяти Л.А. Костандова, ноябрь 2015, Университет Машиностроения, (Москва, 2015); Научно-практической конференции: «Развитие индустрии холода на современном этапе» 2-3 марта 2016г., (Москва, 2016), Научно-практической конференции: «Школа молодых ученых имени профессора И.М. Калниня» 28 февраля-3 марта 2017г., (Москва, 2017).

Публикации

Основные результаты работы опубликованы в 9 научных работах, в том числе 5 в реферируемых журналах ВАК РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа включает в себя введение, пять глав, выводы, список сокращений, приложения и список литературы. Работа содержит 140 страниц машинописного текста, 75 рисунков, 10 таблиц, список литературы из 89 наименования.

Специальность, которой соответствует диссертация

В соответствии со сформулированной целью научной работы, ее научной новизной, установленной практической значимостью, 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 3 «Развитие методов натурного и вычислительного моделирования процессов и объектов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения с целью поиска оптимальных решений по экономичности, надежности и ресурсу низкотемпературных установок, машин и аппаратов».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проведенного исследования, сформированы цели и задачи выполненной работы, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен обзор существующих математических моделей процесса намораживания водного льда на поверхностях различных форм. Проведен обзор конструктивных схем ледогенераторов и холодоаккумуляторов различных типов, а также обзор способов подъема затопленных объектов с

использованием низкотемпературной технологии. Обсуждены вопросы теплофизических и прочностных свойств водного льда.

Как показал анализ публикаций, по теме исследования, существенный вклад в решение задачи расчета динамики намораживания льда внесли ученые-теплофизики: Ламе Г., Клапейрон Б.П.Э., Стефан Й., Нейман Ф., Лейбензон Л.С., Ковнер С.С., Гуйго Э.И., Ржевская В.Б., Сафонов В.К., Планк Р., Константинов Л.И., Мельниченко Л.Г.

Из ныне действующих исследователей заметный вклад вносят: Вайнберг А.М., Сосновский А.В., Генералов М.Б., Лавров Н.А., Белуков С.В., Сластухин Ю.Н., Лобанов И.Е.

На основе проведенного анализа литературных источников, определены основные цели работы и задачи исследования.

Вторая глава посвящена вопросам построения математических моделей намораживания водного льда на элементах низкотемпературного оборудования, представляющих канонические формы поверхности, плоская стенка, полый цилиндр.

В основе подхода лежит метод решения нестационарного дифференциального уравнения Фурье представленного в частных производных путем приведения его к уравнению с полными производными на основе применения расширенной версии подстановки Ламе-Клапейрона, и представления решения в виде степенного ряда, который описывает

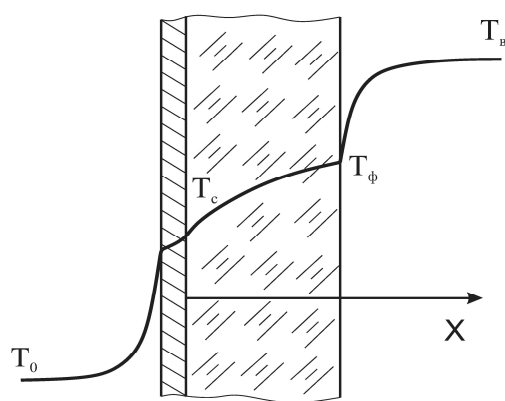


Рисунок 1. Образование льда на плоской стенке.

распределение температур в слое намораживаемого льда и удовлетворяет краевым условиям задачи.

Для случая намораживания водного льда на плоской поверхности (Рисунок 1) исходное дифференциальное уравнение Фурье имеет вид:

$$Cp(T) \cdot \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial X} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right] \quad (1)$$

где: $Cp(T)$ – удельная теплоемкость водного льда, зависящая от температуры Дж/(кг·°С); τ – текущее время, с; X –

пространственная координата; ρ – плотность льда, кг/м³; T – температура в слое намораживаемого льда, К; $\lambda(T)$ – теплопроводность водного льда, зависящая от температуры, Вт/(м·°С).

Краевые условия задачи имеют вид:

$$T(0, \tau) = T_c \quad (2)$$

$$T(X, 0) = T_{\theta} \quad (3)$$

$$T(\xi, \tau) = T_{\phi} \quad (4)$$

Условие теплового воздействия со стороны воды:

$$\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial X} \right|_{X=\xi} = \alpha (T_{\theta} - T_{\phi}) + \rho L \frac{d\xi}{d\tau} \quad (5)$$

Применим к уравнению (1) подстановку Ламе-Клапейрона, т.е. будем искать:

$$T(X, \tau) \equiv T(\nu); \quad \nu = \frac{X}{\sqrt{\tau}}; \quad \xi = \beta \sqrt{\tau} \quad (6)$$

Результирующее уравнение для определения динамики роста слоя водного льда на поверхности плоской стенке:

– с учетом зависимости теплофизических свойств льда от температуры

$$T_c = T_{\phi} - \left(\frac{\rho L}{2\lambda} \beta + \frac{\alpha (T_{\theta} - T_{\phi})}{\lambda} \sqrt{\tau} \right) \beta + \left(\frac{\rho L}{2\lambda} \beta + \frac{\alpha (T_{\theta} - T_{\phi})}{\lambda} \sqrt{\tau} \right)^2 \times \\ \times \frac{\beta^2}{2 \cdot T_{\phi}} - \frac{\rho C_1 T_{\phi}^2}{2K} \beta^3 \left(\frac{\rho L}{2\lambda} \beta + \frac{\alpha (T_{\theta} - T_{\phi})}{2\lambda} \sqrt{\tau} \right) \quad (7)$$

где: T_c – температура поверхности стенки, К; T_{ϕ} – температура фазового перехода воды в лед, К; α – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности льда, Вт/(м²·°С); β – фактор роста толщины слоя льда, м/с^{0.5}; τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности льда, при температуре фазового перехода, Вт/(м·°С); L – теплота фазового перехода воды в лед, Дж/кг.

Для определения искомой толщины слоя льда ξ , на заданный промежуток времени τ необходимо из уравнения (7) найти значение фактора роста слоя льда β , умножение которого на квадратный корень от времени $\sqrt{\tau}$ дает значение ξ , т.е.

$$\xi = \beta \sqrt{\tau} \quad (8)$$

– без учета зависимости теплофизических свойств льда от температуры

$$\xi = \frac{\alpha (T_{\theta} - T_{\phi})}{\rho L} \tau + \frac{\lambda}{\rho L} \sqrt{\left[\frac{\alpha (T_{\theta} - T_{\phi}) \tau}{\lambda} \right]^2 - \frac{2\rho L (T_c - T_{\phi}) \tau}{\lambda}} \quad (9)$$

Для случая намораживания водного льда на внешней цилиндрической поверхности (Рисунок 2) исходное дифференциальное уравнение Фурье, с учетом зависимости теплофизических свойств льда от температуры имеет вид:

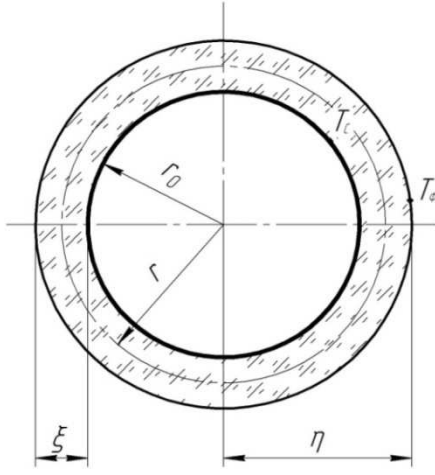


Рисунок 2. Схема

образование льда на внешней
поверхности поллой трубы.

$$Cp(T)\rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{\lambda}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \quad (10)$$

где r – координата фронта фазового превращения.

Краевые условия задачи имеют вид:

$$T(0; \tau) = T_c \quad (11)$$

$$T(r; 0) = T_s \quad (12)$$

$$T(\eta; \tau) = T_\phi \quad (13)$$

Тепловое воздействия со стороны воды
выразим как:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_r = \alpha (T_s - T_\phi) + \rho L \frac{d\eta}{d\tau} \quad (14)$$

Применяя к уравнению (10) подстановку Ламе-Клапейрона, т.е. будем
искать:

$$\nu = \frac{r - r_0}{\sqrt{\tau}}; \quad T(r; \tau) = T(\nu); \quad (\eta - r_0) = \xi(\tau) = \beta \sqrt{\tau} \quad (15)$$

Результирующее уравнение для определения динамики роста слоя водного
льда на внешней цилиндрической поверхности:

– с учетом зависимости теплофизических свойств льда от температуры

$$T_c = T_\phi - \left(\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_s - T_\phi) \right) \beta +$$

$$+ \left[\frac{\left(\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_s - T_\phi) \right)^2}{T_\phi} - \frac{\left(\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_s - T_\phi) \right) \sqrt{\tau}}{\beta \sqrt{\tau} + r_0} + \frac{\beta^2}{2} \right.$$

$$\left. + \frac{\rho C_1 \beta T_\phi}{2k} \left(\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_s - T_\phi) \right) \right] \quad (16)$$

где r_0 – радиус трубы, м; коэффициент температуропроводности $\text{м}^2/\text{с}$.

– без учета зависимости теплофизических свойств льда от температуры

$$T_c = T_\phi - \left[\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_s - T_\phi) \right] \beta - \left[\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha \sqrt{\tau}}{\lambda} (T_s - T_\phi) \right] \times$$

$$\times \left(\frac{\beta}{2a} + \frac{\sqrt{\tau}}{\beta \sqrt{\tau} + r_0} \right) \frac{\beta^2}{2} \quad (17)$$

Толщина слоя водного льда на заданный момент времени определяется по выражению:

$$\xi = \beta \sqrt{\tau} \quad (18)$$

Для случая намораживания водного льда на внутренней цилиндрической поверхности (Рисунок 3) исходное дифференциальное уравнение Фурье запишется как:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{a}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \quad (19)$$

Краевые условия задачи имеют вид:

$$T(r_0, \tau) = T_c \quad (20)$$

$$T(r, 0) = T_e \quad (21)$$

$$T(\eta; \tau) = T_\phi \quad (22)$$

Условие теплового воздействия со стороны воды:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=\eta} = \rho L \frac{\partial(r_0 - \eta)}{\partial \tau} + \alpha_e (T_e - T_\phi) \quad (23)$$

Рисунок 3. Образование льда на внутренней поверхности трубы.

Применим к уравнению (19) подстановку Ламе-Клапейрона, т.е. будем искать:

$$\nu = \frac{r - \eta}{\sqrt{\tau}}; \quad T(r, \tau) = T(\nu); \quad r_0 - \eta = \xi(\tau) = \beta \sqrt{\tau}; \quad (24)$$

Результирующее уравнение для определения динамики роста слоя водного льда на внутренней цилиндрической поверхности:

$$T_\phi = \frac{T_\phi + \frac{\alpha_0 T_0 \beta \sqrt{\tau}}{\lambda}}{\frac{\alpha_0 \beta \sqrt{\tau}}{\lambda} + 1} + \left(\frac{\rho L \beta}{2\lambda} + \frac{\alpha(T_e - T_\phi) \sqrt{\tau}}{\lambda} \right) \beta + \left(\frac{-\rho L \beta}{2\lambda} - \frac{\alpha(T_e - T_\phi) \sqrt{\tau}}{\lambda} \right) \times \times \left(\frac{\beta}{2a} + \frac{\sqrt{\tau}}{r_0} \right) \frac{\beta^2}{2} \quad (25)$$

где: α_0 – коэффициент теплоотдачи от охлаждающей среды к поверхности трубы, Вт/(м²·°С); T_0 – температура охлаждающей среды, К.

В третьей главе приведено описание опытных стендов и методики проведения экспериментального исследования. А так же дается оценка приборной погрешности проведенного исследования.

Схема опытного стенда, для изучения динамики роста слоя водного льда на поверхности плоской стенке Рисунок 4.

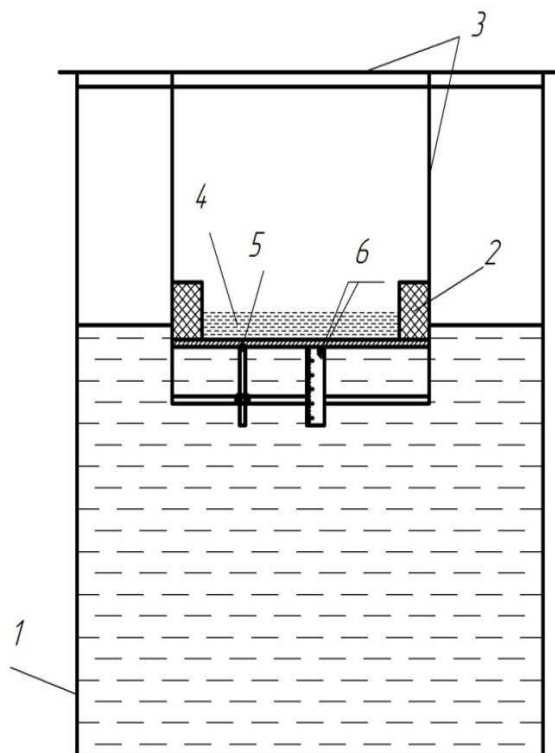


Рисунок 4. Принципиальная схема опытного стенда, для изучения динамики роста слоя льда на плоской поверхности. 1–емкость для воды; 2–элемент эмитирующий плоскую стенку; 3–система для крепления элемента; 4–низкотемпературный энергоноситель; 5–термопара для измерения температуры стенке; 6–термопары для измерения температуры в толще льда.

Схема опытного элемента имитирующего в ходе опыта плоскую изотермическую поверхность представлена на Рисунке 5.

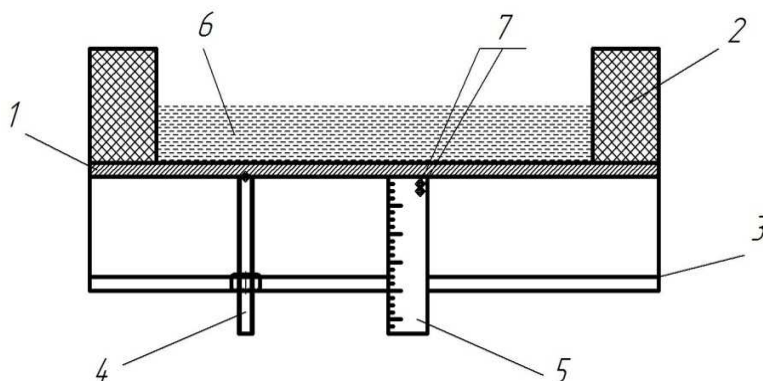


Рисунок 5. Схема элемента эмитирующего плоскую стенку. 1–алюминиевый лист, эмитирующий плоскую стенку; 2–ограждение элемента; 3–мост для крепления измерительных устройств на элементе; 4–штифт для крепления термопары; 5–линейка с мерной шкалой; 6–низкотемпературный хладоноситель; 7–отверстия для крепления датчиков температур.

Схема опытного стенда, для изучения динамики роста слоя водного льда на внутренней поверхности трубы Рисунок 6. Схема опытного элемента с закрепленными на нем средствами измерения представлена на Рисунок 7.

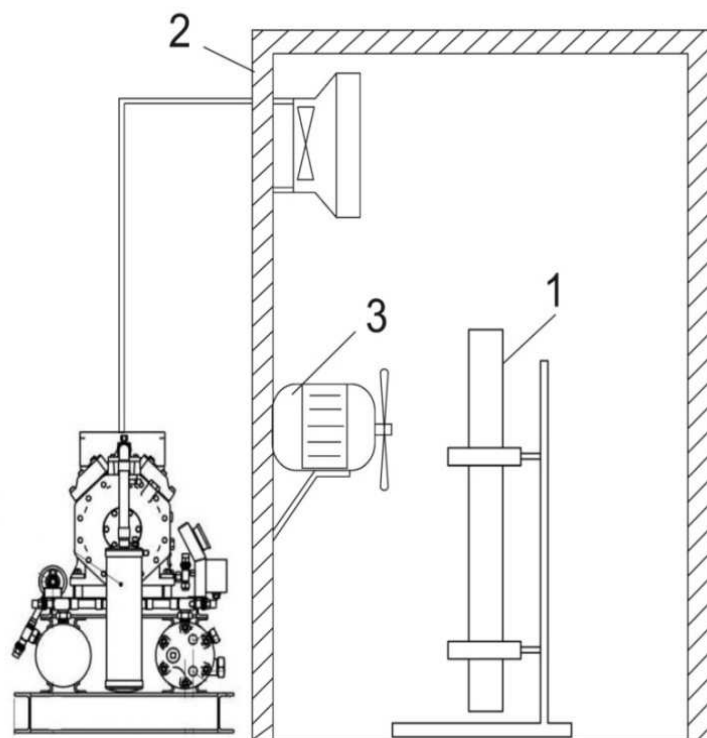


Рисунок 6. Схема опытного стенда для изучения динамики роста слоя водного льда на внутренней поверхности трубы. 1 – элемент, имитирующий трубу; 2 – холодильная камера; 3 – электровентиляторный агрегат.

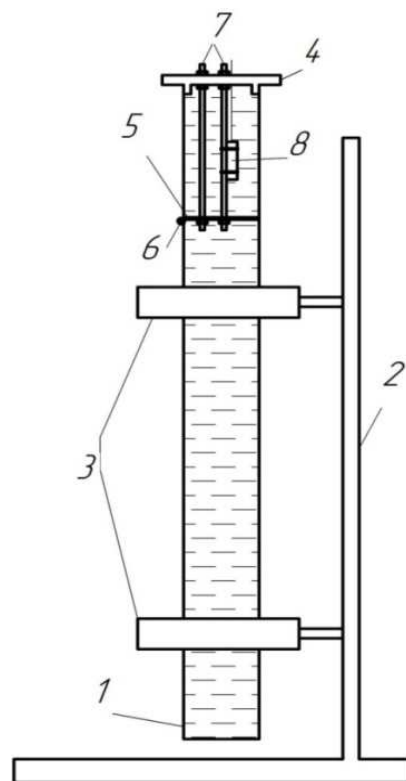


Рисунок 7. Схема опытного элемента. 1 – труба, запаянная с нижнего конца, 2 – стойка, 3 – зажимы, 4 – крепежная полка, 5 – линейка, 6 – термopара, 7 – шпильки, 8 – USB камера.

Схема опытного стенда, для изучения динамики роста слоя водного льда на внешней поверхности трубы Рисунок 8.

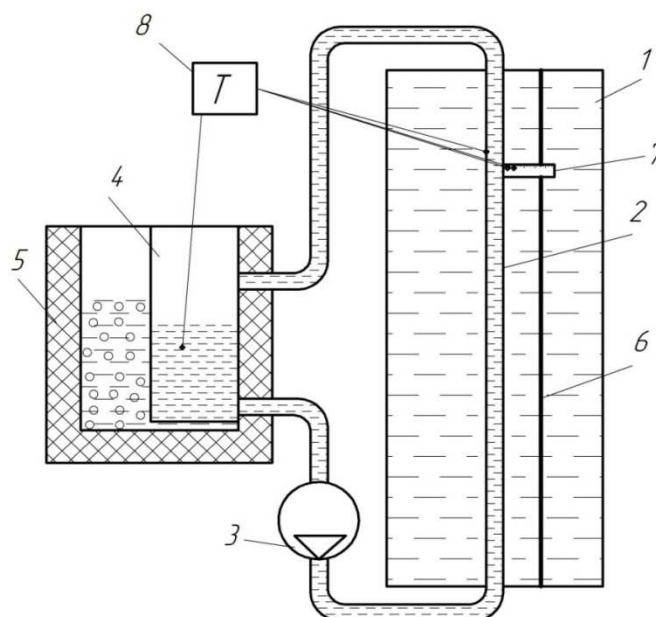


Рисунок 8. Принципиальная схема экспериментального стенда для изучения динамики роста слоя водного льда на внешней поверхности трубы. 1 – стеклянная колба; 2 – труба; 3 – центробежный насос; 4 – теплообменный аппарат; 5 – теплоизолированный бак; 6 – стойка для крепления средств измерения; 7 – линейка; 8 – датчик температур.

Четвертая глава посвящена сопоставлению теоретических и экспериментальных данных.

На Рисунке 9 показано сопоставление расчетных данных, полученных по уравнению (7) с данными опытного исследования, полученными на стенде, схема которого приведена на Рисунке 4.

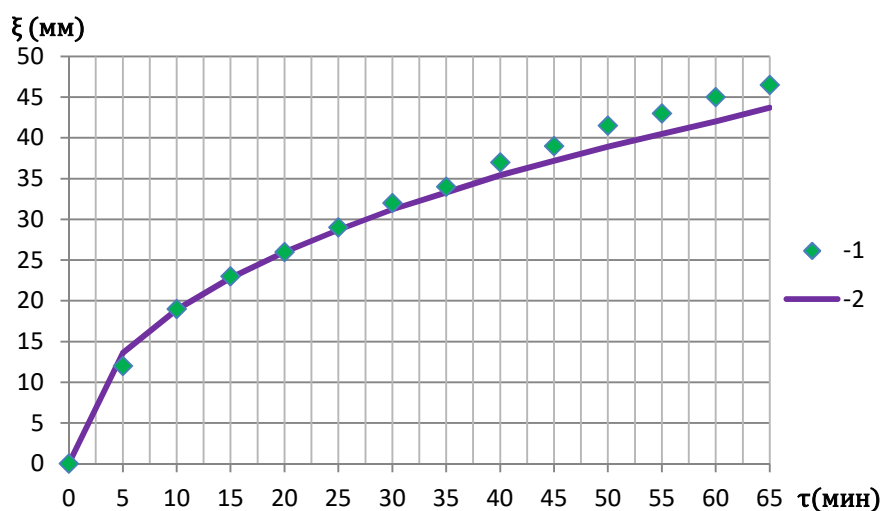


Рисунок 9. Зависимость толщины слоя водного льда от времени. Температура стенки $t_c = -48,5^\circ\text{C}$, температура воды $t_b = +7,8^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от воды $\alpha = 104 \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретический расчет.

На Рисунке 10 показано сопоставление расчетных данных, полученных по уравнению (25) с данными опытного исследования, полученными на стенде, схема которого приведена на Рисунке 6.

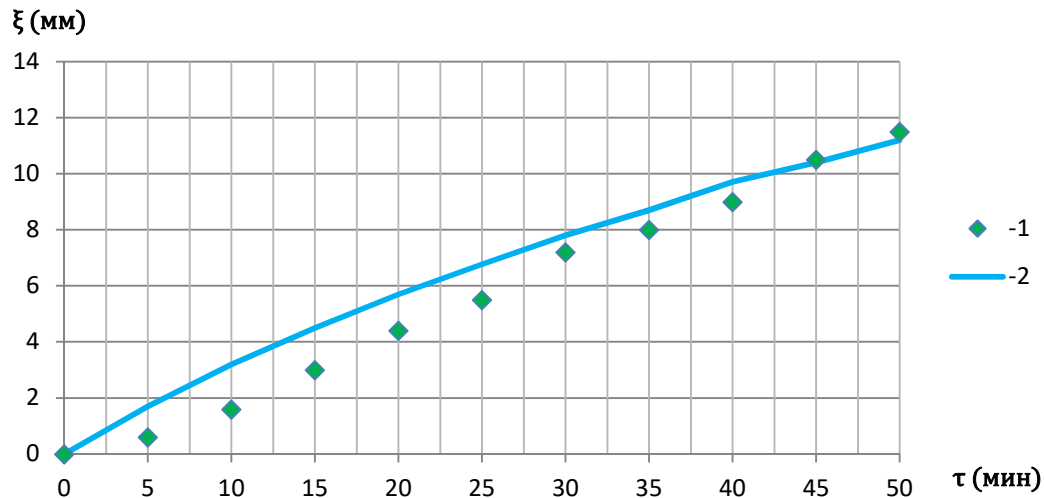


Рисунок 10. Зависимость толщины слоя водного льда от времени, на внутренней поверхности трубы. Температура воздуха $t_{\text{в}}=-13^{\circ}\text{C}$, скорость потока воздуха $v=14$ м/с, коэффициент теплоотдачи от воды $\alpha=74$ Вт/м²·гр. 1 – экспериментальные данные 2 – теоретический расчет.

На Рисунке 11 показано сопоставление расчетных данных, полученных по уравнению (17) с данными опытного исследования, полученными на стенде, схема которого приведена на Рисунке 8.

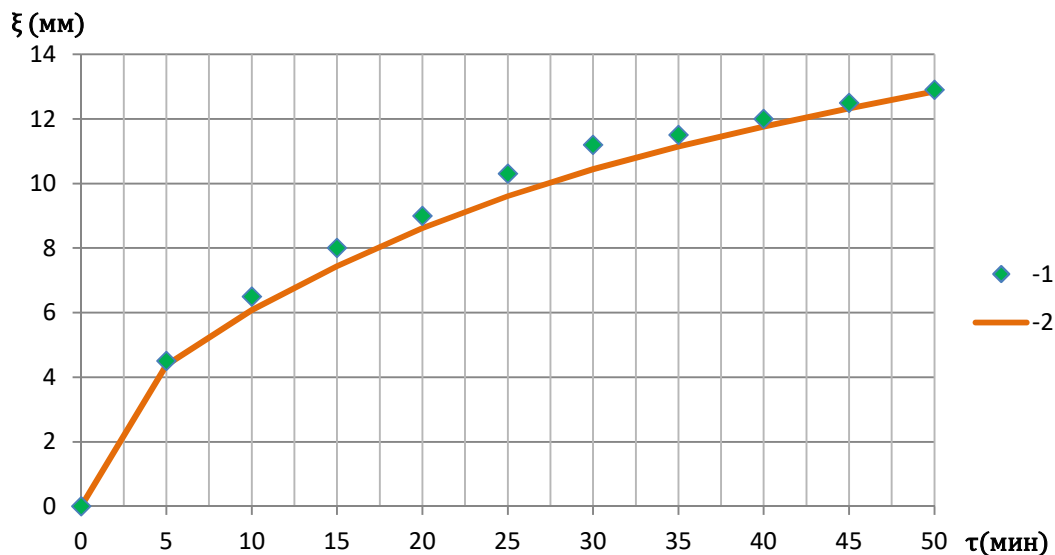


Рисунок 11. График зависимости толщины слоя водного льда на внешней цилиндрической поверхности от времени. Температура стенки $t_{\text{с}}=-12,4^{\circ}\text{C}$, температура воды $t_{\text{в}}=5,5^{\circ}\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от воды $\alpha=195$ Вт/(м²·°C). 1 – экспериментальные данные; 2 – теоретический расчет.

В пятой главе представлена схема устройства (криокуветы) для подъема затопленных оболочковых объектов, находящихся в стадии высокого коррозионного износа. Предложена методика расчета режима работы криокуветы. Изложен метод расчета и осуществлен выбор эффективной поверхности намораживания водного льда, применительно к ледогенераторам различных конструкций.

Принципиальная схема устройства для подъема оболочковых объектов (криокуветы) представлена на Рисунке 12.

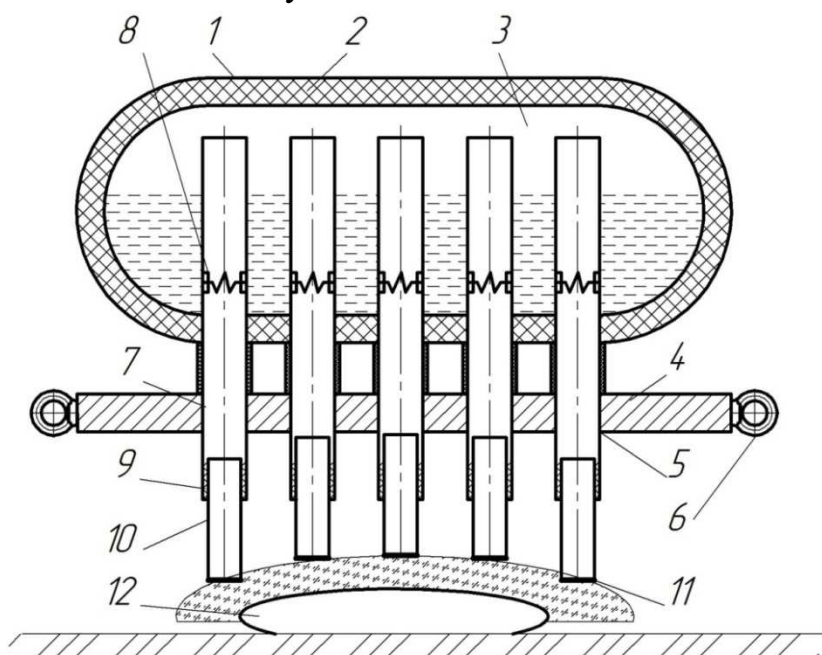


Рисунок 12. Принципиальная схема криокуветы

Подъемное устройство состоит из криорезервуара 1, оснащенного теплоизолированными стенкам 2 и имеющего внутреннюю полостью 3, с возможностью наполнения её низкотемпературным энергоносителем. Так же устройство включает каркас-матрицу 4, с размещенными по поверхности отверстиями 5, и грузовыми креплениями 6 на краях. Патрубки 7 проходят через внутреннюю полость 3 криорезервуара 1, таким образом, что между концами патрубков и верхней стенкой внутренней полости 3 остается пространство. Патрубки жестко фиксируются в отверстиях 5 каркас-матрицы 4. На нижних концах патрубков 7 имеется внутренняя резьбовая нарезка 9, необходимая для крепления выдвижных стаканов-наконечников 10 с плоскими доньшками 11 на концах. На боковой поверхности патрубков 7 расположены впускные клапаны 8, через которые низкотемпературный энергоноситель попадает внутрь патрубков 7 и стаканов-наконечников 10.

С целью проверки возможности применения низкотемпературной технологии для поднятия затопленных объектов, был создан опытный стенд, имитирующий работу элемента криокуветы (стакана-наконечника) Рисунок 13.

На Рисунке 14 показана схема криозахвата фиксированного груза с помощью охлаждаемого стакана-наконечника посредством образованного ледяного моста.

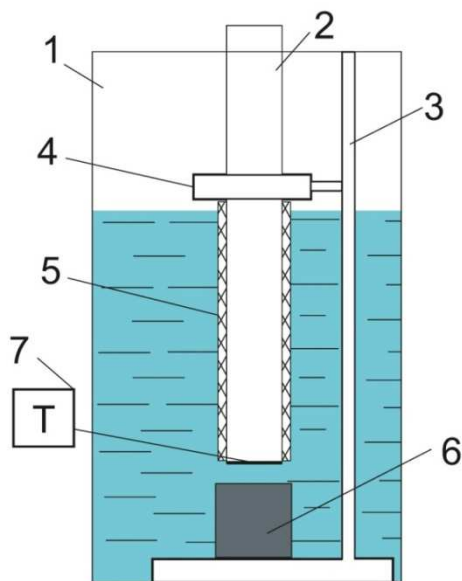


Рисунок 13. Схема опытного стенда, имитирующего работу криокюветы. 1– емкость для воды; 2 – стакан-наконечник; 3 – стойка; 4 – зажим; 5 – теплоизоляция; 6 – поднимаемый груз; 7 – термоизмерительное оборудование

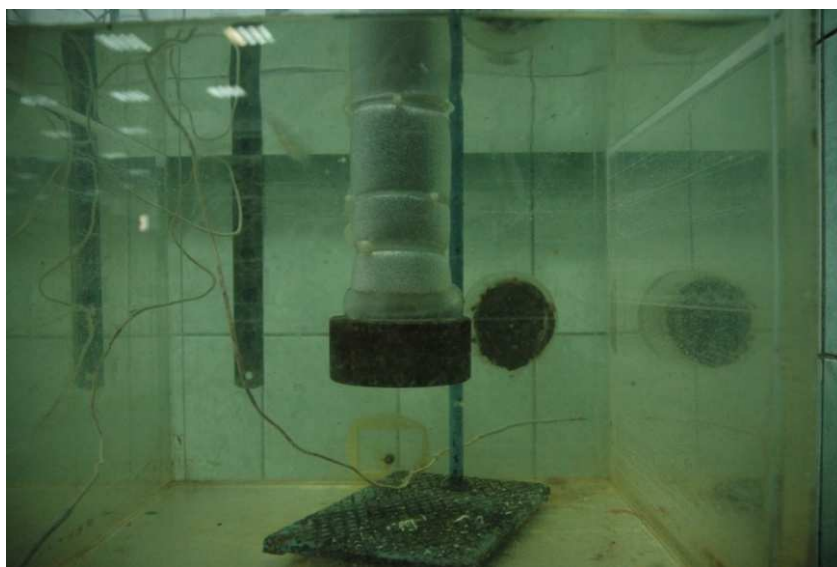


Рисунок 14. Фотография начала подъема стакана-наконечника с примороженным грузом

Результаты расчета, эффективной поверхности намораживания, в графической форме, представлены на Рисунке 15.

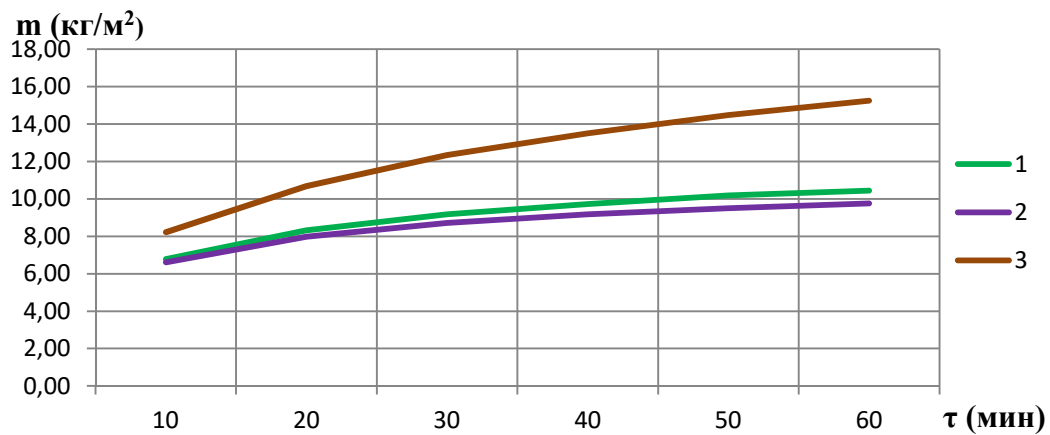


Рисунок 15. График динамики роста массы водного льда на различных поверхностях при одинаковых температурах поверхности намораживания и омывающий лед воды. Температура поверхности намораживания $t_c = -13^\circ\text{C}$, температура воды $t_v = 10^\circ\text{C}$, радиус трубы $r_0 = 0,04$ м. 1 – плоская поверхность; 2 – наружная цилиндрическая поверхность; 3 – внутренняя цилиндрическая поверхность.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что в существующей практике проектирования ледогенераторов и холодоаккумуляторов расчет динамики намораживания водного льда осуществляется по зависимостям, предполагающим стационарное распределение температур в слоях ледяного криосадка, что в ряде случаев приводит к погрешностям в расчетах.

2. На основе решения нестационарного дифференциального уравнения Фурье созданы математические модели протекания процесса намораживания водного льда на поверхностях различных форм.

3. На специально созданных стендах получены опытные данные, определяющие характеристики процесса намораживания водного льда применительно к поверхностям, характерным ледогенераторов и холодоаккумуляторов различных типов.

4. Проведено сопоставление результатов расчетов, выполненных на основе теоретических моделей с опытными данными, расхождение по толщине льда от времени намораживания, не превысило 6-8%

5. Осуществлен выбор эффективной, по способности накапливания водного льда, формы поверхности намораживания.

6. Разработана конструктивная схема устройства криозахвата оболочковых объектов, находящихся на шельфе водных бассейнов.

7. Получены экспериментальные данные по предельно допустимым нагрузкам при извлечении оболочковых объектов из водной среды,

посредством смораживания их с подложкой охлаждаемых наконечников криоокюветы.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. К вопросу о рациональном выборе формы поверхности намораживания водного льда // Известия Московского государственного технического университета «МАМИ», №3 (17), Т.2, 2013 г. С.51 – 55. (0,38 п.л./ 0,19 п.л.).
2. Маринюк Б.Т., Серенов И.И., Угольникова М.А. Использование потенциала отрицательных температур окружающего воздуха в холодоаккумуляционных установках // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2014. №1 (19). С.38-43. (0,57 п.л./ 0,18 п.л.).
3. Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. Применение низкотемпературной технологии для подъема оболочковых объектов контейнерного типа со дна водных бассейнов // Холодильная техника, №1, 2015 г. С. 47–50. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.).
4. Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. , Серенов И.И. 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.(0,15 п.л./ 0,05 п.л.).
5. Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. Динамика намораживания водного льда на трубчатых элементах ледогенераторов // Холодильная техника, №12, 2016 г. С. 44–47. (0,4 п.л./ 0,2 п.л.).
6. Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. Динамика намораживания льда на элементах низкотемпературного оборудования // 63-я Открытая студенческая научно-техническая конференция СНТК Университета машиностроения. Сборник работ, 2013 г. С. 482–485. (0,38 п.л./ 0,19 п.л.).
7. Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. Теплообмен в условиях намораживания льда на оребренной поверхности, погруженной в воду с постоянной температурой // Сборник тезисов к конференции «Инновационные разработки в области техники и физики низких температур» 2013 г. С.137. (0,057 п.л./ 0,028 п.л.).
8. Руденко М.Ф., Маринюк Б.Т., Угольникова М.А. Криогенные технологии в нефтегазовых комплексах добычи и транспортировки углеводородного сырья // «Нефть и газ» (Казахстан) №5 2015 г С. 91–100. (1,155 п.л./ 0,38 п.л.).
9. Marinyuk B. T., Ugolnikova M. A., and Serenov I. I., Heat transfer of a straight flat fin surface subjected to low temperature and immersed in an aqueous medium with a constant temperature // Chemical and Petroleum Engineering, 2016 Vol. 51, P. 835 – 837. (0,289 п.л./ 0,096 п.л.).