

Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной
промышленности – филиал Федерального государственного бюджетного
научного учреждения «Федеральный научный центр пищевых систем
им. В. М. Горбатова» РАН

На правах рукописи

Борщев Георгий Владимирович

**Исследование пленочного обтекания ледовых поверхностей с фазовым
переходом для создания аккумуляторов с регулируемой интенсивностью
теплоотвода в пищевой промышленности**

Специальность 4.3.3. – «Пищевые системы»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Гончарова Галина Юрьевна

Москва – 2024

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	10
1.1 Актуальность совершенствования систем хранения тепловой энергии	10
1.2 Обзор современных систем льдоаккумуляции	11
1.3 Способы повышения эффективности льдоаккумуляторов объёмного типа плавления	26
1.4 Оценка возможности применения пленочного механизма обтекания в льдоаккумуляторах	34
1.5 Математическое моделирование процессов с фазовым переходом и различными видами течения.....	41
1.6 Применение льдоаккумуляторов на объектах пищевой промышленности..	44
1.7 Выводы по обзору научно – технической литературы	49
ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ЛЕДОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ.....	50
2.1 Экспериментальные исследования тепломассообменных процессов в коаксиальном пленочном льдоаккумуляторе.....	50
2.1.1 Состав экспериментального стенда	50
2.1.2 Методика проведения исследований	55
2.1.3 Подготовка и проведение эксперимента	55
2.1.4 Методика обработки экспериментальных данных.....	57
2.2 Анализ экспериментальных исследований	60
2.2.1 Обсуждение полученных результатов.....	60
2.2.2. Оценка неопределенности определения коэффициента теплоотдачи.....	70
2.2.3 Создание эмпирической зависимости.....	75
2.2.4 Обработка результатов методами теории подобия	80

2.3 Выводы по главе 2.....	87
ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБКЕ	89
3.1 Построение геометрии расчетной области.....	89
3.2 Математическая постановка задачи.....	91
3.3 Обработка результатов моделирования.....	96
3.4 Анализ результатов численного моделирования.....	98
3.5 Выводы по главе 3.....	102
ГЛАВА 4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРОВ	103
4.1 Определение перспективных направлений применения пленочных льдоаккумуляторов	103
4.2 Оценка экономической эффективности применения пленочного льдоаккумулятора	112
4.2.1. Подбор системы охлаждения для низового объекта молочной промышленности.....	113
4.2.2. Оценка капитальных и эксплуатационных затрат.....	114
4.3 Выводы по главе 4.....	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	121
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	123
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	140

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Стратегиями «Научно-технологического развития Российской Федерации до 2030 г.» и «Развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года» предусматривается необходимость решения важных государственных задач, направленных на повышение эффективности переработки сельскохозяйственной продукции, сокращения потерь продовольствия, создания безопасных и качественных продуктов питания. Эти задачи неразрывно связаны с совершенствованием процессов холодильной обработки. Для ряда холодильных систем, применяемых в пищевой промышленности, систем кондиционирования, и иных инженерных объектов, использующих установки искусственного холода, характерна высокая степень неравномерности тепловой нагрузки, как в течение суток, так и по временам года. Для подобных объектов рационально использовать льдоаккумуляторы (ЛА). Особое значение это имеет для предприятий, использующих ледяную воду, а также для систем кондиционирования воздуха производственных, торговых и иных объектов. В качестве рабочего тела для таких систем наиболее перспективным решением является применение водного льда, который обладает рядом весомых преимуществ:

- экономическая выгода за счет использования ночных тарифов;
- доступность;
- оптимальные теплофизические свойства;
- возможность аккумулирования холода с последующим его использованием на температурном уровне 0°C;
- нетоксичность.

Однако, на сегодняшний день не раскрыт весь природный потенциал льда, как рабочего вещества, в аккумуляторах холода. В существующих аккумуляторах холода механизм теплосъёма является недостаточно эффективным, так как реализуется процесс плавления в объёме жидкости, что характеризуется низкими

значениями коэффициента теплоотдачи. В настоящей работе рассмотрен переход от плавления льда в большом объёме к плёночному обтеканию поверхности льда. Применение плёночного механизма обтекания позволит существенно увеличивать интенсивность теплоотвода в соответствии с графиком изменения действующих тепловых нагрузок. Моделирование и экспериментальные исследования обтекания ледовой поверхности тонкой плёнкой позволят получить необходимую базу для дальнейшей разработки и ввода в эксплуатацию нового поколения льдоаккумуляторов. Создание нового поколения аппаратов позволяющих обеспечивать симметричный ответ на повышение тепловой нагрузки за счет высокой интенсивности плавления льда обеспечит минимально возможный температурный уровень продукционной воды и максимально эффективное плавление ледовой поверхности. Это особенно актуально при явно выраженном пиковом характере тепловых нагрузок и позволит в несколько раз снизить установленную мощность холодильного оборудования.

Степень разработанности темы исследования.

Значительный вклад в исследование и усовершенствование льдоаккумуляторов внесли отечественные и зарубежные ученые: Гончарова Г.Ю., Креймер Н.Г., Медникова Н.М., Медовар Л.Е., Пытченко В.П., Cabeza L. F., Mehling H., Stovall T.K., и др.

Объект исследований: плёночный льдоаккумулятор.

Предмет исследований: плёночное обтекание ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела фаз.

Цель работы.

Исследование процессов плёночного обтекания ледовых поверхностей с фазовым переходом для создания высокоэффективных льдоаккумуляторов с регулируемой интенсивностью теплоотвода для предприятий пищевой промышленности.

Основные задачи работы.

1) Провести обзор и анализ существующих типов льдоаккумуляторов и обосновать выбор наиболее эффективного способа теплоотвода в процессе разрядки льдоаккумулятора.

- 2) Разработать схему и создать экспериментальный стенд для исследования плавления ледовых структур в различных режимах на макетном образце ЛА.
- 3) Разработать методики проведения экспериментов по изучению процессов тепломассообмена при разрядке льдоаккумулятора в режимах плёночного обтекания, плавления в объёме жидкости и с использованием барботирования.
- 4) Исследовать процессы тепломассообмена при различных режимах плавления льда в диапазоне расходов $0,25 - 1$ кг/с и температур $20 - 60$ °С подаваемой на охлаждение воды.
- 5) Провести научное обобщение экспериментальных данных в виде: эмпирической зависимости, критериального уравнения и численной модели для расчета интенсивности пленочного плавления ледовых структур в ЛА.
- 6) Провести сравнительную оценку экономической эффективности использования плёночных ЛА в системах хладоснабжения и определить наиболее перспективные направления их дальнейшего внедрения.

Научная новизна.

- 1) Впервые получены экспериментальные данные по интенсивности теплоотвода при пленочном обтекании с плавлением ледовых поверхностей в диапазоне расходов $0,25 - 1$ кг/с и температур $20 - 60$ °С подаваемой на охлаждение воды.
- 2) Предложена эмпирическая зависимость для расчёта отводимой теплоты в указанных диапазонах в процессе разрядки льдоаккумулятора с пленочным механизмом обтекания.
- 3) Впервые методом анализа размерностей выведено критериальное уравнение, описывающее интенсивность теплоотвода при плавлении льда, позволяющее масштабировать полученные результаты для проектирования аналогичных промышленных аппаратов.

- 4) Впервые экспериментально подтверждена возможность охлаждения воды до околонулевых температур в пленочном ЛА при плотности теплового потока свыше $230\,000\text{ Вт/м}^2$ и разности температур свыше 50 градусов.
- 5) Разработана численная модель, описывающая плавление льда на цилиндрической трубке, омываемой пленкой жидкости.

Теоретическая и практическая значимость.

- 1) Определены диапазоны режимных параметров охлаждаемой воды ($t_{\text{вх}}$) и плотностей орошения (Γ_v), в которых наиболее целесообразно использование льдоаккумулятора с плёночным режимом плавления.
- 2) Разработано техническое решение, и испытан макетный образец ЛА в виде башенной конструкции с коаксиальными змеевиками на созданном экспериментальном стенде для дальнейшего совершенствования процессов охлаждения пищевой продукции.
- 3) Полученное критериальное уравнение для расчета интенсивности пленочного плавления ледовых структур в ЛА будет использовано для инженерных расчетов и проектирования подобных аппаратов.
- 4) Получен патент на изобретение № 2814476 “Способ охлаждения воды и устройство для его осуществления”.

Методология и методы исследования.

При выполнении исследования использовались расчётно-аналитические методы, применялись методы математического моделирования, статистической обработки экспериментальных данных с применением специализированных компьютерных программ. Теоретические и экспериментальные методы исследований проводились во «ВНИХИ» – филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН.

Положения, выносимые на защиту.

- 1) Методика проведения экспериментальных исследований плавления льда при пленочном обтекании.

2) Экспериментальные данные по теплосъёму, полученные в широком диапазоне температур и расходов.

3) Численная модель плавления льда, критериальное уравнение и эмпирическая зависимость для расчета отводимой теплоты в процессе разрядки льдоаккумулятора с пленочным механизмом обтекания.

Личный вклад автора.

Автором обоснована конструкция и техническое решение, спроектирован макетный образец пленочного льдоаккумулятора. Разработана методика и проведены серии экспериментальных исследований пленочного теплообмена на границе раздела фаз. Разработана математическая модель и выведено критериальное уравнение, описывающие процесс плавления льда на цилиндрических трубках. Разработана эмпирическая зависимость для расчета отводимой теплоты в процессе разрядки льдоаккумулятора с пленочным механизмом обтекания.

Достоверность результатов работы.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением аттестованных измерительных средств, апробированных методик измерения и воспроизводимостью полученных результатов.

Апробация работы.

Результаты работы докладывались и обсуждались на III Международной научной конференции «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» SEWAN-2021 (Санкт – Петербург, 2021 г.); XV Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов (Москва, 2022 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Развитие индустрии холода на современном этапе» в рамках международной выставки «МИР КЛИМАТА ЭКСПО 2023» (Москва, 2023 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Развитие индустрии холода на современном этапе» в рамках международной выставки «МИР КЛИМАТА ЭКСПО 2024» (Москва, 2024 г.)

Результаты исследования получены при поддержке проекта РФФИ № 20-08-00120, субсидии МГТУ им. Баумана № FSFN-2023-0004 и в рамках госзадания FGUS-2022-0014.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, в том числе 4 в журналах, рекомендуемых ВАК РФ и 1 в журнале, индексируемом в международной базе Scopus.

Структура и объём работы.

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, списка использованной литературы и приложения. Работа изложена на 146 страницах текста, содержит 70 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 119 наименований.

ГЛАВА 1. ОБЗОР НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Актуальность совершенствования систем хранения тепловой энергии

Согласно прогнозам ООН ожидается, что к 2050 г. количество единиц холодильного оборудования вырастет в мире до 9,5 млрд., при этом потребность в системах охлаждения составит 14 млрд. Доля мирового холодильного сектора, потребляющая по статистическим данным на 2020 год около 20% мировой электроэнергии, иллюстрирует важность холодильной отрасли в мировой экономике и энергетическом балансе. Международный институт холода (англ. International Institute of Refrigeration) полагает, что мировой спрос на электроэнергию для холодильного сектора, может более чем удвоиться к 2050 г. [1]. Подобная тенденция формирует требования к повышению энергоэффективности систем хладоснабжения.

Помимо этого, важнейшими задачами являются декарбонизация (снижение выбросов CO₂) и уменьшение эмиссии парниковых газов в целом. Согласно Парижскому соглашению, принятому в 2015г., Российская Федерация взяла на себя обязательство снижения выбросов парниковых газов до 70% от уровня 1990 года [2,3]. Целью данного соглашения является обеспечение сдерживания роста глобальной средней температуры, чтобы не допустить её повышения более чем на 2 градуса [4]. В 2016 году в г. Кигали (Руанда) на XXVIII совещании сторон Монреальского протокола принята Кигалийская поправка, предусматривающая постепенное сокращение выпуска фреонов группы ГФУ (гидрофторуглеродов), что связано с высоким значением потенциала глобального потепления у данных хладагентов [5]. Предполагается, что Российская Федерация сократит потребление ГФУ к 2036 году на 85%.

В связи с вышеизложенным, на сегодняшний день важнейшими вызовами, с которыми сталкивается холодильная отрасль, являются необходимость увеличения энергоэффективности, а также повышение экологической безопасности эксплуатируемых холодильных систем. Существенный вклад в

решение поставленных задач вносит рационализация работы систем хладоснабжения на объектах с ярко выраженным пиковым характером тепловых нагрузок. Такими объектами являются предприятия пищевой промышленности, сельского хозяйства, торгово-развлекательные комплексы, для которых характерна высокая степень неравномерности распределения тепловой нагрузки, как в течение суток, так и по временам года. Для данных объектов наиболее рациональным является применение систем хладоснабжения с хранилищами тепловой энергии (ХТЭ).

1.2 Обзор современных систем льдоаккумуляции

ХТЭ работают по принципу зарядки и разрядки: накопления тепловой энергии в наиболее благоприятные промежутки времени, и дальнейшей реализации накопленной энергии в необходимый потребителю период. ХТЭ могут быть реализованы при помощи различных видов технологий хранения энергии. Данные виды подразделяются на явное хранение тепла, термохимическое хранение тепла и скрытое хранение тепла [6].

1) Явное хранение тепла представляет собой использование большого объёма предварительно нагретой или охлажденной жидкости. Системы явного хранения тепла обладают удельной ёмкостью хранения от 10 до 50 кВт·ч на тонну, а рабочий диапазон температур варьируется в зависимости от аккумулирующего вещества.

Технологии явного хранения включают:

- резервуары для хранения тепловой энергии с использованием воды в качестве теплоносителя;
- твёрдотельные хранилища с использованием, например, кирпича, камня, бетона, твёрдой засыпки и пр.;
- расплавы солей;
- подземные хранилища тепловой энергии

2) Термохимическое хранение тепла обеспечивает высокую плотность накапливаемой энергии. В его основе лежат процессы одного из двух типов: сорбция или обратимые реакции (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 - Процессы и методы термохимического хранения тепла

Технологии термохимического хранения включают:

- химические петли;
- гидратацию соли;
- абсорбционные системы.

3) Скрытое хранение тепла основывается на использовании скрытой теплоты фазового перехода (обычно кристаллизация/плавление). При этом существует несколько видов веществ подобного типа, применяющихся в системах хранения тепловой энергии (рисунок 1.2).

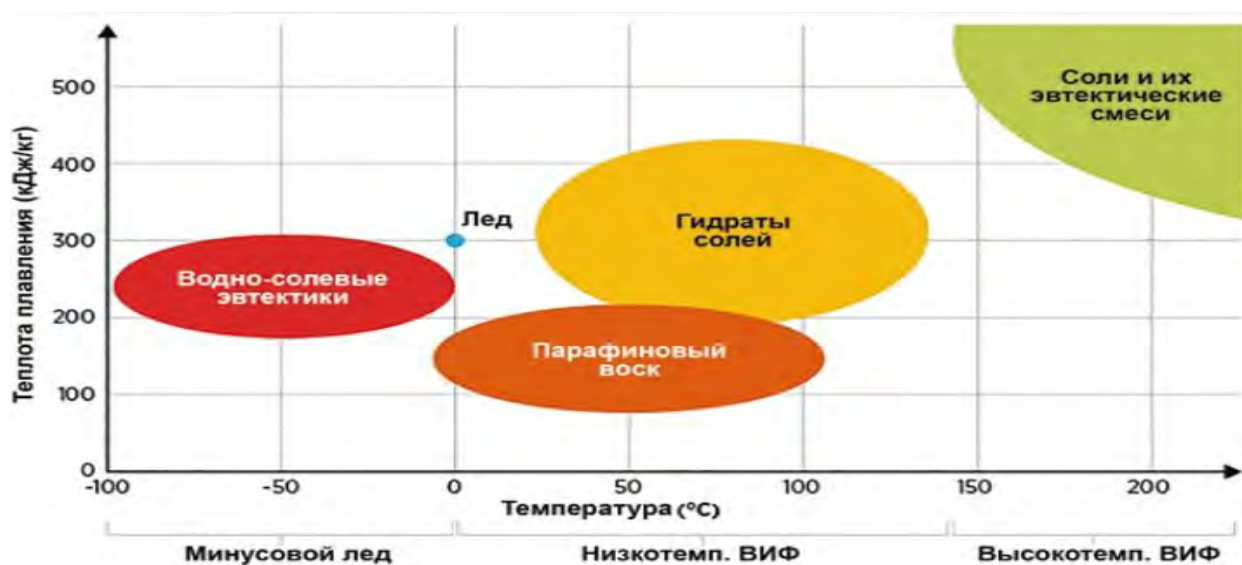


Рисунок 1.2 – Вещества, используемые для скрытого хранения тепла в ХТЭ

К таким видам относятся:

- вещества с изменяющейся фазой - ВИФ (англ. Phase change material), также встречается аббревиатура ВФП – вещества с фазовым переходом;
- лёд;
- водно-солевые эвтектики;
- парафиновый воск;
- гидраты солей.

Наиболее рациональным и экономически выгодным видом ХТЭ для использования в холодильной технике на околонулевом температурном уровне являются льдоаккумуляторы. Это объясняется тем, что рабочим телом в ЛА выступает водный лёд, характеризующийся простотой получения, нетоксичностью, что особенно важно для объектов пищевых производств, а самое главное, одним из самых высоких показателей скрытой теплоты фазового перехода «плавление - кристаллизация» – 335 кДж/кг.

Технология накопления водного льда – льдоаккумуляция, предоставляет потребителю достаточно широкий спектр преимуществ:

- возможность накопления холода в периоды с малыми тепловыми нагрузками на холодильную установку с последующим использованием его в технологических процессах предприятия;
- обеспечение равномерной нагрузки на холодильную установку, что повышает надежность и уменьшает износ компрессорного оборудования, а также снижает установленную мощность холодильных машин;
- эффективный теплосъём пиковых нагрузок со стороны потребителя холода без использования дополнительных холодильных мощностей [7];
- уменьшение затрат на электроэнергию за счет использования льготных тарифов в процессе аккумуляирования холода в ночное время суток, а также разгрузка электросети (рисунок 1.3)



Рисунок 1.3 - Применение технологии льдоаккумуляции для разгрузки электросети

Для наиболее распространенных типов льдоаккумуляторов можно использовать следующую классификацию [8]:

- 1.Льдоаккумуляторы с намораживанием льда на поверхности змеевиков или панелей.
- 2.Льдоаккумуляторы с применением капсул.
- 3.Льдоаккумуляторы с использованием льдоводяной суспензии (бинарного льда).
- 4.Льдоаккумуляторы с намораживанием за счет естественного холода.

При этом существуют и другие виды льдоаккумуляторов, например льдоаккумуляторы с использованием гидратов, однако они встречаются существенно реже вышеперечисленных [9].

На сегодняшний день наиболее распространенными типами льдоаккумуляторов в Российской Федерации являются аппараты с намораживанием льда на теплообменной поверхности и дальнейшем плавлением в объеме воды - погружные трубчатый змеевиковый и панельный (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 - Секции трубчатого и панельного льдоаккумуляторов

Трубчатые змеевиковые льдоаккумуляторы могут быть изготовлены из меди, нержавеющей стали различных марок, полиэтилена. Промышленные панельные льдоаккумуляторы в подавляющем большинстве изготавливаются из нержавеющей стали. Исторически в СССР сложилась тенденция к более широкому применению панельных льдоаккумуляторов в связи с дефицитом цельнотянутых труб, однако на сегодняшний день в Российской Федерации наиболее распространенным типом аппаратов является трубчатый.

Зарядка подобных ЛА происходит следующим образом: за счет кипения в секциях аппарата хладагента или циркуляции хладоносителя с температурой ниже температуры кристаллизации воды на внешней теплообменной поверхности намораживается лёд до заданной толщины. В процессе разрядки отепленная вода от потребителя подаётся в ёмкость льдоаккумулятора, где охлаждается за счёт смешения с водой межтрубного пространства и плавления накопленного льда и поступает обратно к потребителю. Толщина намораживаемого льда в промышленном льдоаккумуляторе составляет 35 мм – 40 мм (возможна до 100 мм). Температура хладоносителя или кипения хладагента, циркулирующего в трубах или панелях аппаратов, по данным большинства производителей составляет минус 10 – минус 15°C. При этом в работе [10] при исследовании процесса зарядки ЛА змеевикового типа температура кипения хладагента для

систем с непосредственным охлаждением изменялась в диапазоне от минус 1 °С до минус 3,5 °С в начальный момент зарядки до температуры минус 4 °С - минус 9 °С в конце процесса зарядки (рисунок 1.5).

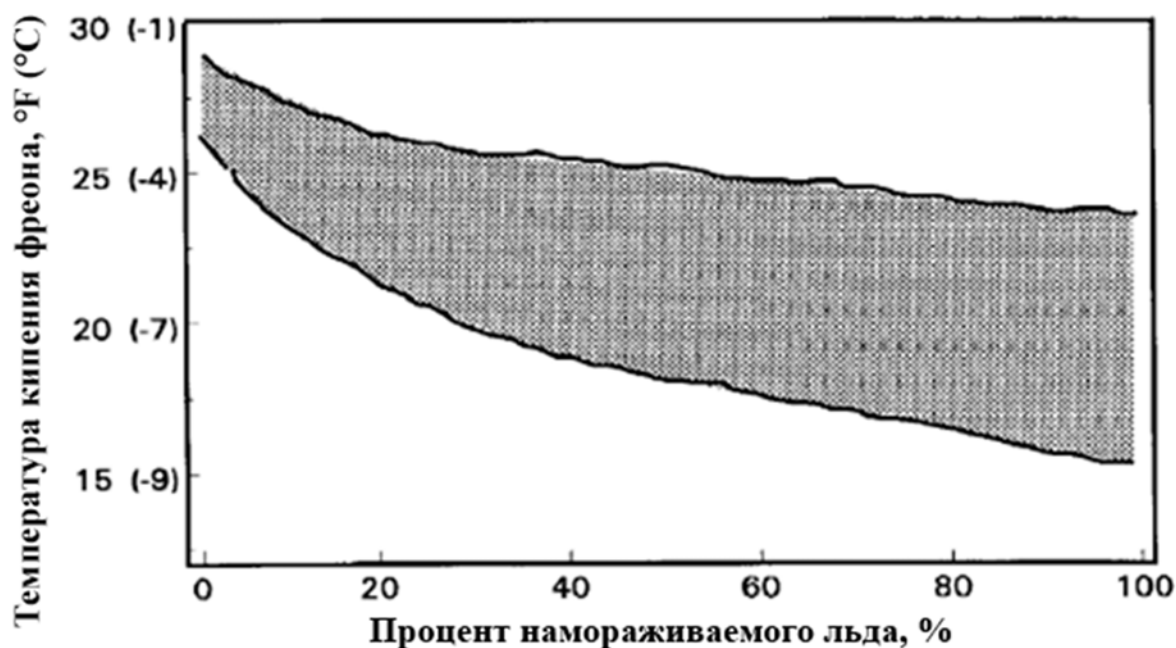


Рисунок 1.5 - Температура кипения хладагента в зависимости от уровня зарядки
ЛА

Предпочтение (для процесса намораживания) отдается трубчатым ЛА (кроме аппаратов из труб диаметром более 40 мм), поскольку удельное количество накопленного льда может достигать 100 кг – 120 кг на 1 м² по сравнению с панельными – 70 кг - 80 кг на 1 м² теплообменной поверхности аппарата. Важным преимуществом трубчатых теплообменных секций, перед панельными, является большая площадь поверхности намораживаемого льда, в расчёте на единицу теплопередающей поверхности аппарата.

По геометрическим соотношениям кожух такого промышленного льдоаккумулятора может быть выполнен, как в виде прямоугольной или цилиндрической ёмкости, так и в виде башенной конструкции, когда высота значительно превышает диаметр и основание аппарата (рисунок 1.6).



а)

б)

Рисунок 1.6 – Типы льдоаккумуляторов

а) льдоаккумулятор в прямоугольной ёмкости; б) льдоаккумулятор башенного типа

Наиболее распространенным типом льдоаккумуляторов в ёмкостях прямоугольной конструкции являются аппараты с модульной компоновкой. Так, например, льдоаккумуляторы серии ИТ компании «Орелхолодмаш», в зависимости от требований потребителя поставляются с количеством секций, от числа которых зависит максимальная масса намораживаемого льда (рисунок 1.7).

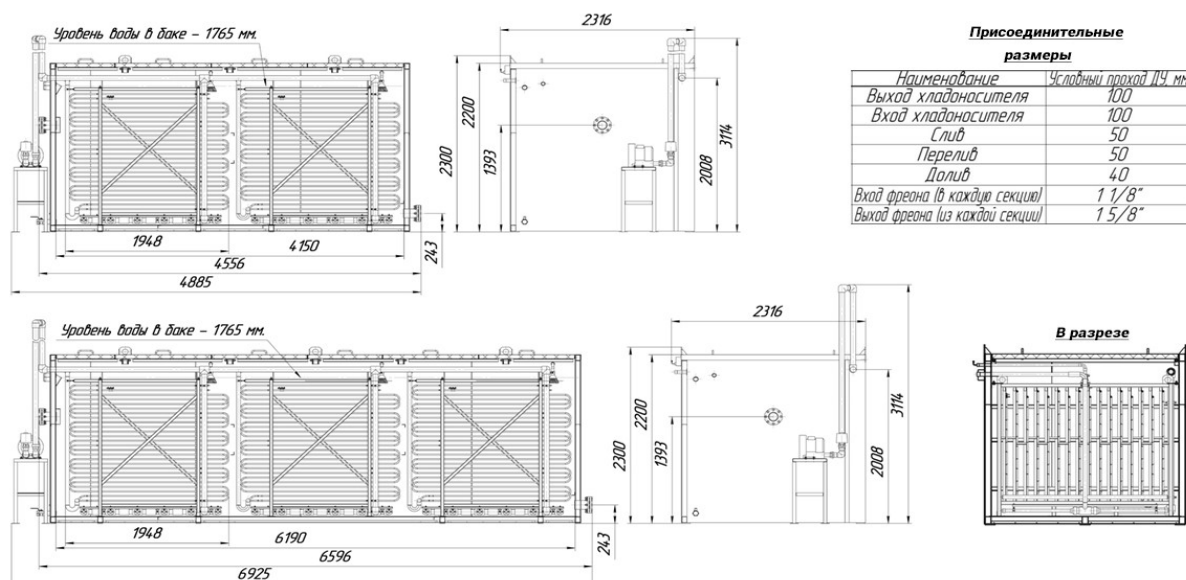


Рисунок 1.7 - Схема льдоаккумуляторов ИТ-06Л и ИТ-09Л [11]

На представленной схеме видно, что в зависимости от количества модулей также подбирается длина бака льдоаккумулятора.

К льдоаккумуляторам в цилиндрической ёмкости можно отнести различные аппараты с коаксиальной намоткой труб. Например, к таким аппаратам относятся льдоаккумуляторы фирмы CALMAC® (Рисунок 1.8) применяемые в системах кондиционирования воздуха (СКВ).

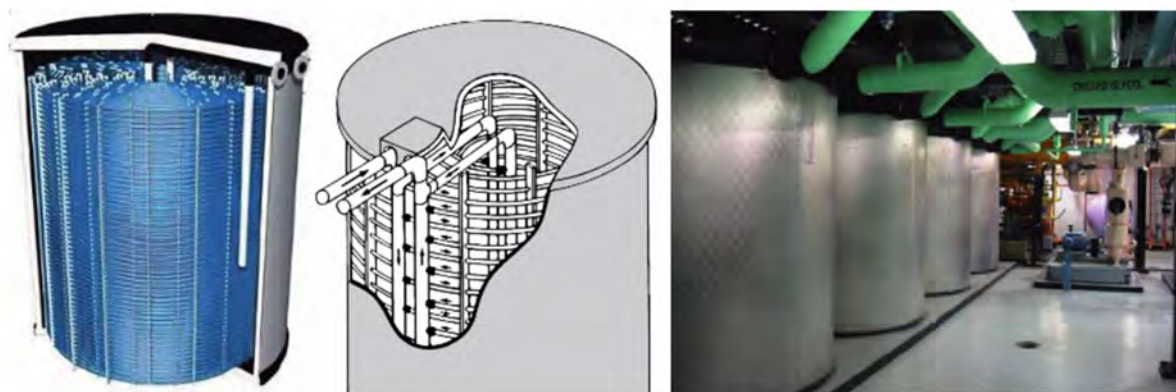


Рисунок 1.8 - Системы аккумуляции холода CALMAC® ICE BANK

Распространенность ЛА объёмного типа плавления обусловлена тем, что данные аппараты могут быть использованы во многих отраслях. В частности, такие льдоаккумуляторы применяются в СКВ [12], в системах охлаждения жидкой пищевой продукции [13] и даже в тепловых насосах [14]. Наиболее существенным недостатком льдоаккумуляторов данного вида является низкая интенсивность плавления льда в объёме жидкости.

Отдельным направлением технологии льдоаккумуляции является создание аккумуляторов холода с применением бинарного льда, так же известного как айс сларри (англ. ice slurry). Бинарный лед представляет собой однородную смесь жидкой фазы и мелких кристаллов водного льда (от 10 до 100 мкм), приготовленную в специальных генераторах на основе водного раствора, включающего компонент, понижающий температуру образования льда (соли, спирты и пр.) (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 - Бинарный лёд высокой концентрации

Это позволяет использовать фазовый переход «плавление - кристаллизация» при температурах водного раствора ниже 0°C . Благодаря присутствию водного льда в составе двухфазного хладоносителя бинарный лёд подходит для использования в процессах охлаждения при пиковых нагрузках [15,16]. Системы с генерацией бинарного льда имеют достаточно широкую практическую сферу применения: охлаждение рыбы [17], использование в системах кондиционирования воздуха [18], медицине [19] и пр. В то же время применение бинарного льда в пищевой промышленности крайне ограничено по ряду причин:

1. Риск подмораживания или замораживания охлаждаемого пищевого продукта из-за температуры суспензии ниже температуры кристаллизации воды.
2. В качестве компонента понижающего температуру раствора можно выбрать крайне узкий спектр веществ, в связи с требованиями, предъявляемыми к пищевой безопасности.
3. В случае перекачивания бинарного льда через теплообменные аппараты с малым проходным сечением существует вероятность перекрытия каналов ледяной фракцией.
4. Необходимость применения специальных генераторов бинарного льда.
5. Необходимость перемешивания полученной смеси, а, следовательно, и дополнительные затраты электроэнергии на устройства перемешивания. В

противном случае спустя некоторое время бинарный лёд стратифицируется на ледяную и жидкостную фракции.

В то же время, последний недостаток также может быть и достоинством в случае применения бинарного льда в СКВ. В частности, компания Mueller® [20] в 1998 году запустила систему кондиционирования воздуха на основе бинарного льда, получаемого с использованием 7% водного раствора гликоля, для торгового центра Techno Mart 21 расположенного в г. Сеул, Южная Корея (Рисунок 1.10).

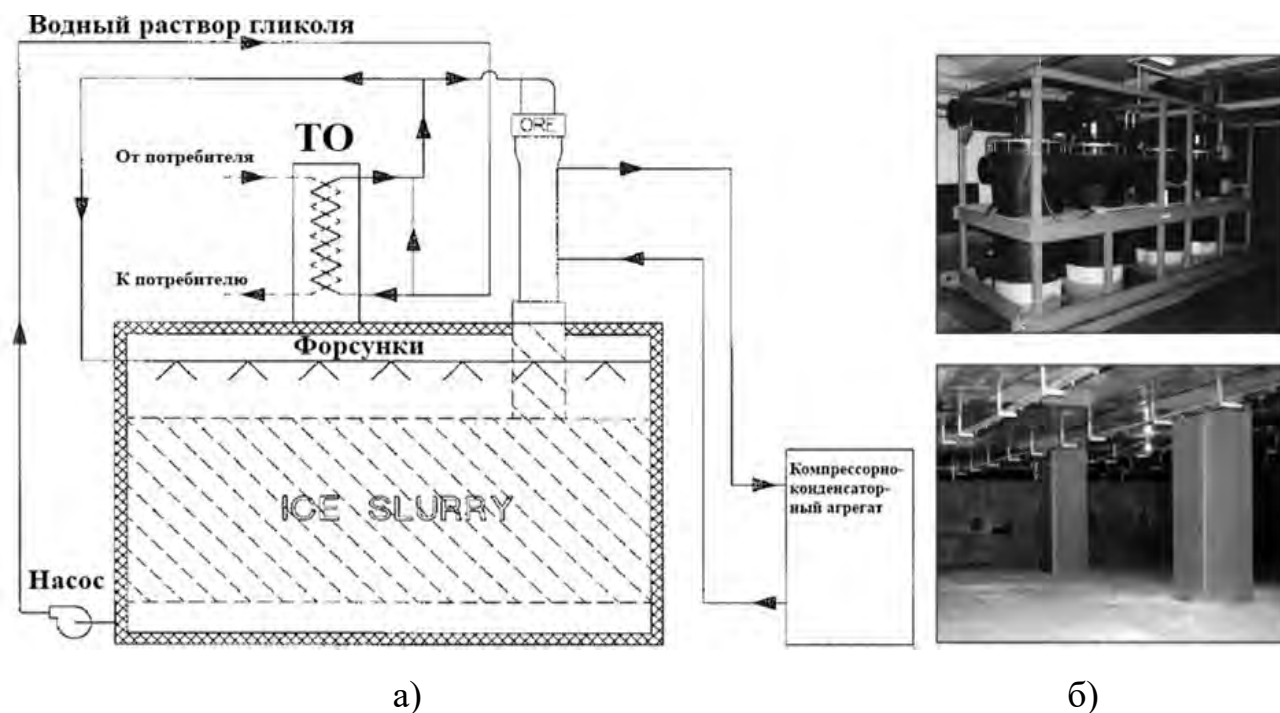


Рисунок 1.10 - а) Схема системы охлаждения на основе бинарного льда; б) генераторы бинарного льда ORE-400 и льдохранилище

На рисунке 1.10 можно видеть, что бинарный лёд после стратификации образует в льдохранилище ледовую прослойку со значительной поверхностью теплообмена. Благодаря этому, при орошении льда отепленным раствором, поступающим от потребителя, обеспечивается эффективное охлаждение. Разработанная система кондиционирования с применением бинарного льда позволяет охлаждать инфраструктуру торгового центра с площадью 260 000 м². Период окупаемости данной системы составил 1,1 года.

Развивающимся направлением технологии льдоаккумуляции является применение льдохранилищ с капсулами различной геометрии для намораживания

внутри них льда в качестве ВИФ (рисунок 1.11) [21]. Ключевой особенностью применения данных капсул является то, что вещество находящееся внутри не контактирует с веществом, омывающим капсулу.



Рисунок 1.11 - а) Сферическая капсула с ВИФ; б) Заполненное льдохранилище

Это позволяет, с одной стороны, выбирать вещество, совершающее фазовый переход исходя из требований к температуре плавления, а с другой позволяет использовать различные виды хладоносителей. Достаточно часто, в контексте льдоаккумуляции, встречается комбинация из хладоносителя на основе растворов пропилен- или этиленгликолей совместно с капсулами, содержащими воду или водный раствор. В основном применяемые капсулы изготавливают из пластика, однако они также могут быть изготовлены из металла [22]. Применяемые капсулы могут различаться по своим размерам, так в основном применяются капсулы с диаметром от 60 до 120 и более миллиметров сферической формы. Однако использование капсул других геометрических форм является более предпочтительным с позиции большей поверхности теплообмена на единицу объема капсулы. В зависимости от выбора тех или иных форм оболочки для одного и того же вещества, содержащегося внутри капсул, зависит интенсивность теплообмена, заполняемость льдоаккумулятора, а также аккумуляционная способность. Так, при зарядке льдоаккумулятора с содержащими воду сферическими капсулами с диаметром 70 и 80 мм возможно

накапливать от 76,4 до 84,8 кВт·ч запасаемой энергии с 1 м³ льдохранилища [23].

Недостатками данной технологии являются:

1. Наличие стенки, разделяющей хладоноситель и вещество в капсуле, что добавляет дополнительное термическое сопротивление.
2. Необходимость обеспечения герметичности капсул.
3. В случае применения в капсулах веществ, понижающих температуру фазового перехода совместно с водой, в процессе плавления происходит стратификация фаз, что в дальнейшем приводит к неоднородному замерзанию объёма жидкости при последующих циклах зарядки. В связи с этим стараются применять эвтектические растворы, которые не разделяются на фракции при циклах разрядки.
4. На объектах пищевой промышленности возможно использовать весьма узкий спектр веществ, применяемых для зарядки и разрядки омываемых капсул в связи с требованиями к безопасности.

Эффективность системы охлаждения с капсулами оценивалась в работе [24]. Было проведено сравнение системы хладоснабжения с капсульным льдохранилищем с системой без использования аккумуляции холода в СКВ супермаркета GIMSA г. Анкара, Турция. Экономический эффект применения льдохранилища достигался при использовании трехтарифной системы учета расхода электроэнергии. Так пиковыми часами по стоимости электроэнергии являлся период с 17:00 до 22:00, полупиковая зона с 06:00 до 17:00 и ночной тариф начинался в 22:00 и заканчивался в 06:00. Холодильная система состояла из чиллера, бака-льдохранилища, ледяных капсул, теплообменника, насосов и трехходовых вентилей (рисунок 1.12).

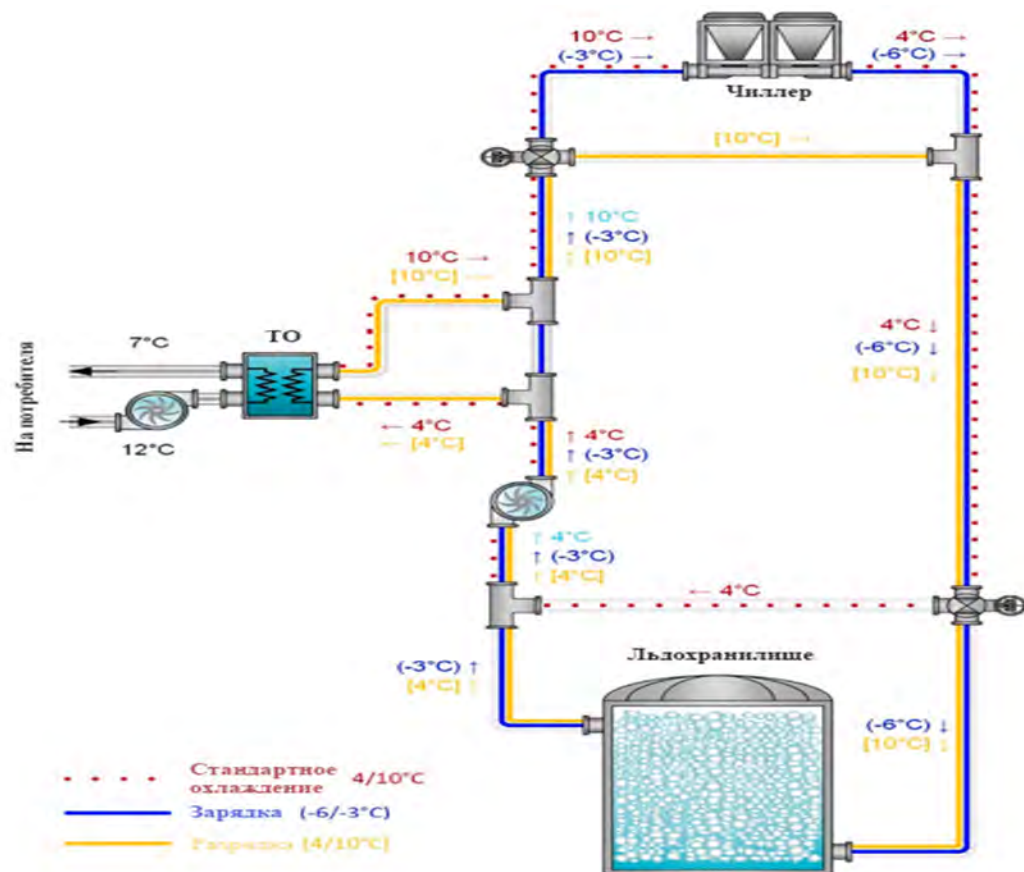


Рисунок 1.12 - Схема холодильной системы с льдоаккумуляцией в гипермаркете «GIMSA»

Установка с льдохранилищем работает следующим образом: в процессе зарядки между чиллером и льдохранилищем циркулирует 35% раствор этиленгликоля, поступающий в льдохранилище с температурой минус 6°C и выходящий из него с температурой минус 3°C . В льдохранилище находятся капсулы, вода в которых совершает фазовый переход и в процессе зарядки превращается в лёд. Зарядка льдохранилища происходит в период с 22:00 до 06:00, что соответствует ночному тарифу электроэнергии. Чиллер в полупиковые часы работает в режиме охлаждения, когда хладоноситель минуя льдохранилище подается непосредственно в теплообменный аппарат, в котором происходит охлаждение воды, подаваемой потребителю. В пиковые часы чиллер отключают, а хладоноситель направляют в контур льдохранилища. При этом в данном режиме обеспечивается охлаждение хладоносителя с температуры 10°C до температуры 4°C . Согласно данным, полученным авторами статьи, стоимость электроэнергии,

затраченной на работу холодильной установки с льдохранилищем за 40 месяцев эксплуатации, составила 86 115 долларов США, в то время как по расчетам при использовании холодильной системы без льдохранилища за тот же временной период стоимость использованной электроэнергии составила бы 292 256 долларов США. Таким образом, применение системы с льдоаккумуляцией уменьшило расходы на электроэнергию на 70,53 %. Окупаемость представленной установки составила 27 месяцев.

Для определенных задач не потерял своей актуальности способ накопления льда, намораживаемого в условиях естественного холода [25]. Принцип работы таких льдохранилищ следующий: в льдохранилище или в бунт загружается лёд, заранее собранный и выколотый с замерзшей поверхности водоёмов, в случае необходимости использования запасенной энергии накопленный лёд плавят, а получаемая таким образом ледяная вода, впоследствии расходуется на нужды потребителя. Достоинствами такого вида льдоаккумуляции является малозатратное получение льда, образующегося за счет естественного холода, а также общая простота данной технологии. В СССР одним из наиболее распространенных схемных решений, позволявших использовать аккумулированную энергию природного льда, являлось использование стаивания в бунтах по методу В. А. Бобкова (рисунок 1.13) [26].

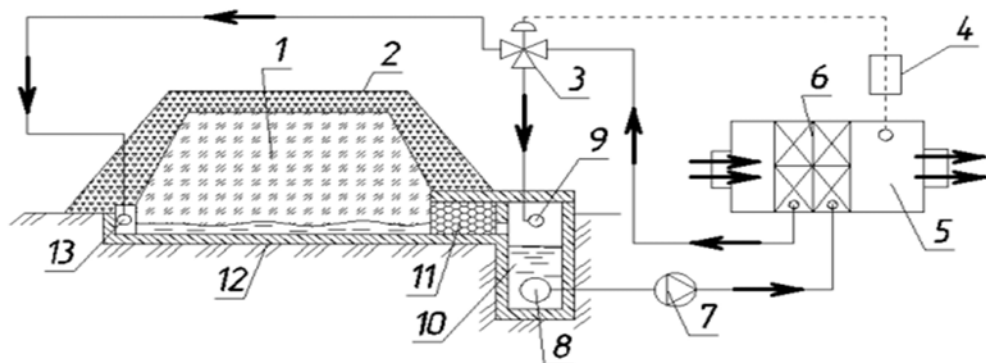


Рисунок 1.13 - Схема стаивания естественного льда в бунте по методу В.А. Бобкова: 1 – лёд; 2 – насыпная изоляция, 3 – трехходовой клапан, 4 – регулятор температуры, 5 – кондиционер, 6 – поверхностный воздухоохладитель, 7 – насос, 8 – фильтр, 9 – слив воды в канализацию, 10 – приямок для талой воды, 11 – гравийный фильтр, 12 – площадка, 13 – коллектор отепленной воды

Отдельным ответвлением данной технологии является получение ледяной воды из насыпного снега. В работе [27] представлено сезонное снегохранилище, обеспечивающее получение ледяной воды для последующего использования в технологическом кондиционировании (рисунок 1.14).

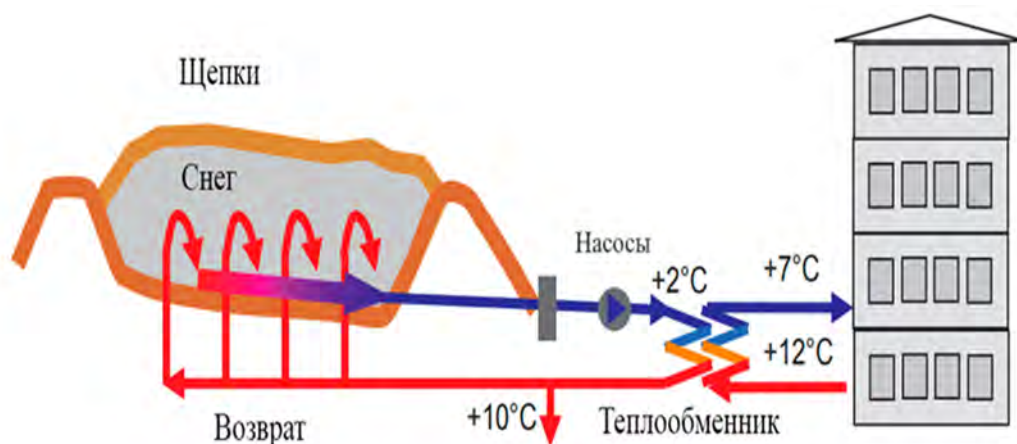


Рисунок 1.14 - Схема снегохранилища на $60\,000\text{ м}^3$ для охлаждения региональной больницы площадью $190\,000\text{ м}^2$ в Сундсвалле, Швеция

Снег, запасённый в заранее приготовленном теплоизолированном углублении, орошают теплой водой, поступающей от потребителя, в результате чего на дне образуется талая вода, которая забирается насосом и подается на объект технологического кондиционирования.

Недостатками применения естественного холода является невозможность повсеместного использования в связи с различными климатическими особенностями регионов, а также зависимость от сезона, во время которого возможно проводить накопление льда и снега. Дополнительно необходимо отметить логистические издержки при перевозке льда и обеспечения его сохранности, в случае необходимости длительного транспортирования.

Сводная информация о рассмотренных льдоаккумуляторах представлена в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Сводная таблица рассмотренных льдоаккумуляторов

Вид льдоаккумулятора	Область применения	Факторы, сдерживающие широкое распространение
Льдоаккумуляторы с намораживанием льда на поверхности змеевиков или панелей и дальнейшем плавлении в объёме воды	Охлаждение пищевой продукции, СКВ, тепловые насосы	Снижение значений коэффициента теплопередачи в процессе зарядки. Низкая интенсивность плавления льда.
Льдоаккумуляторы с использованием льдоводяной суспензии	СКВ, охлаждение морской рыбы и морепродуктов, медицина	Необходимость перемешивания суспензии. Ограниченный набор рабочих веществ, применяемых в водных растворах. Невозможность использования в теплообменных аппаратах с малым проходным сечением.
Льдоаккумуляторы с применением капсул	СКВ	Ограниченный набор рабочих веществ, применяемых в водных растворах.
Льдоаккумуляторы с намораживанием за счет естественного холода	СКВ, охлаждение пищевой продукции	Логистические издержки. Зависимость от климатических условий.

1.3 Способы повышения эффективности льдоаккумуляторов объёмного типа плавления

Среди представленных систем льдоаккумуляции на территории РФ наибольшее распространение получили льдоаккумуляторы с намораживанием льда на теплообменной поверхности аппаратов и последующем плавлении в объёме воды. При этом данные аппараты не лишены недостатков, таких как

ухудшение теплопередачи в процессе зарядки за счет роста термического сопротивления при увеличении толщины льда, и наиболее значимым – низкой интенсивности плавления льда в объёме жидкости в процессе разрядки ЛА. Таким образом, для данных льдоаккумуляторов важным направлением является совершенствование процессов зарядки и разрядки.

Намораживание льда большой толщины снижает энергетическую эффективность процесса зарядки. Данный эффект связан с работой холодильной установки при пониженных температурах кипения по причине роста термического сопротивления при увеличении толщины намораживаемого льда. На рисунке 1.15 представлены зависимости коэффициента теплопередачи от толщины намораживаемого льда в панельном и трубчатом льдоаккумуляторах для значений коэффициентов теплоотдачи со стороны хладагента $\alpha_x \approx 1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, со стороны воды $\alpha_v \approx 500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

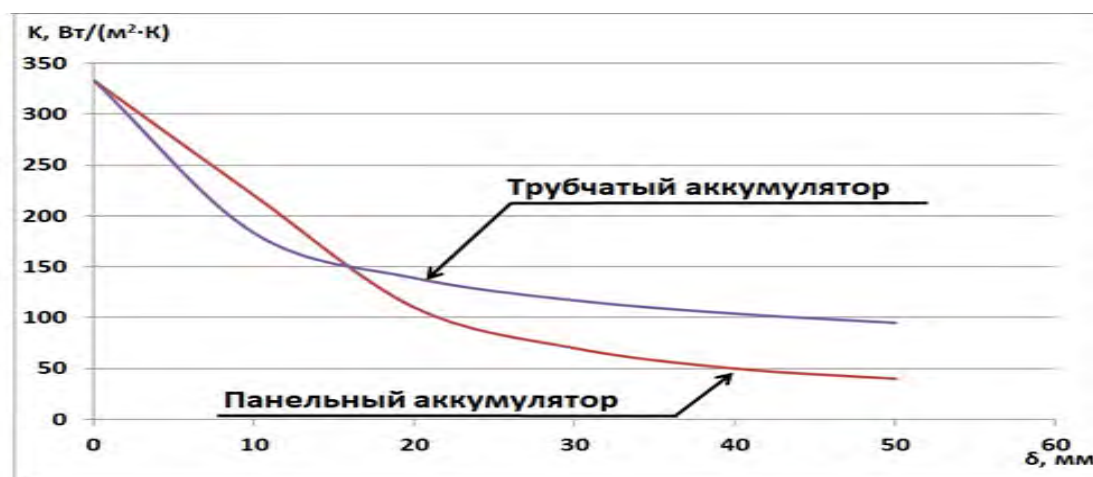


Рисунок 1.15 - Уменьшение коэффициента теплопередачи при увеличении толщины намораживаемого льда для трубчатого и панельного льдоаккумуляторов[28]

Можно видеть, что с увеличением толщины намораживаемого льда коэффициент теплопередачи существенно снижается, что приводит к увеличению затрат электроэнергии во время процесса намораживания. Однако выбор рациональной толщины намораживания льда в трубчатых льдоаккумуляторах должен производиться с учётом критической толщины льда. Авторами работы [29] определена максимальная энергетически выгодная толщина

намораживаемого льда, которая ограничивается значениями 40 - 50 мм. Повышение интенсивности процесса намораживания возможно при периодической оттайке льда в ЛА. Так в работе [30] и в патенте [31] представлен льдоаккумулятор с повышенной интенсивностью намораживания льда. Увеличение интенсивности достигается за счет того, что при намораживании слоя льда толщиной 5 мм на панели испарителя, происходит кратковременная подача газа с температурой 45 °С, что приводит к оттайке и последующему всплытию ледовой фракции. Таким образом, обеспечивается более высокий коэффициент теплопередачи в процессе зарядки. Такой же подход к интенсификации процесса намораживания представлен в работе [32]. Согласно авторам для повышения интенсивности процесса зарядки толщина намораживаемого льда на панелях должна составлять от 5 до 8 мм, по достижении которой необходимо включать оттайку. В патенте № RU131465U1 [33] предлагается повысить эффективность зарядки льдоаккумулятора путем периодического повышения давления в испарителе. Схема льдоаккумулятора представлена на рисунке 1.16.

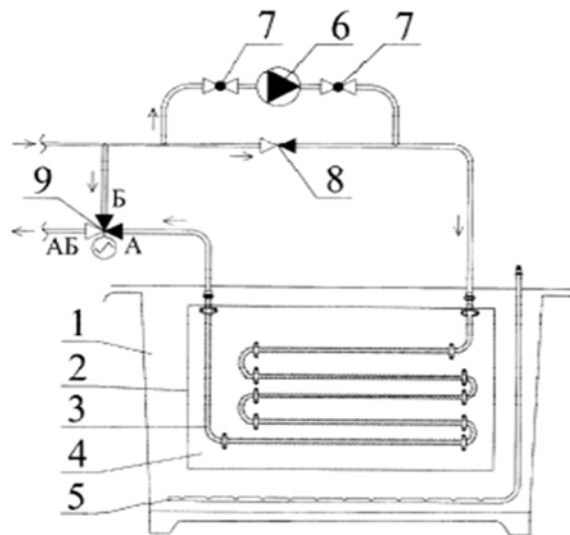


Рисунок 1.16 - Схема льдоаккумулятора по патенту RU131465U1;

- 1 – теплоизолированный бак, 2 – теплообменные элементы в форме кассет, 3 – металлический гофрированный змеевик, 4 – крепежный лист для змеевика, 5 – барботажная трубка, 6 – насос высокого давления, 7 – запорные клапаны, 8 – обратный клапан, 9 – трехходовой клапан

Предлагается при нарастании слоя льда и увеличении термического сопротивления производить периодическое повышение давления в змеевиках при помощи насоса высокого давления и обратимо деформировать трубки (за счет линейного расширения), тем самым разрушая замороженный лёд.

Одним из возможных решений для повышения энергоэффективности в процессе зарядки ЛА является применение комбинированных систем, в которых зарядка проводится при помощи естественного и искусственного холода. Так в патенте № RU 2484396 рассматривается способ повышения энергоэффективности образования льда на поверхности теплообменных секций за счет установки в кожух льдоаккумулятора дополнительной секции с хладоносителем с температурой кристаллизации значительно ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, циркулирующим через внешний охладитель [34]. Линия с внешним охладителем работает в холодное время года, что позволяет существенно уменьшать затраты электроэнергии на зарядку льдоаккумулятора. Схематичное изображение установки представлено на рисунке 1.17.

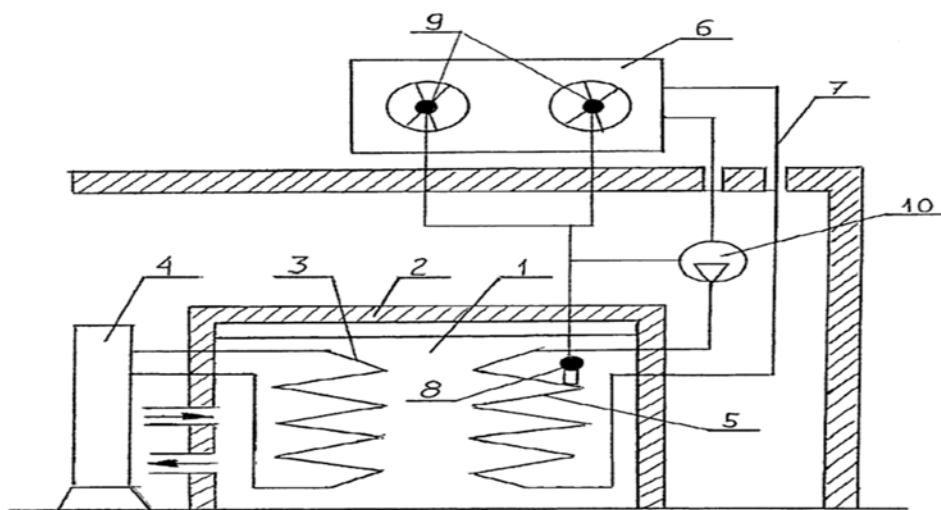


Рисунок 1.17 - Схема ЛА по патенту № RU 2484396:

1 – льдоаккумулятор, 2 – теплоизолированная ёмкость, 3 – основная теплообменная секция, 4 – холодильная установка, 5 – дополнительная теплообменная секция, 6 – воздушный охладитель внешнего хладоносителя, 7 – замкнутый гидравлический контур, 8 – датчик контроля толщины льда, 9 – вентилятор, 10 – насос.

Согласно расчетам, которые были проведены авторами патента, применение такой схемы для молокозавода с холодильной установкой с максимальной холодопроизводительностью 300 кВт и пиковым энергопотреблением 100 кВт позволит за два зимних месяца при температуре воздуха ниже минус 10°C уменьшить длительность работы холодильной установки на 50 %.

В патенте № RU 2287749 представлен башенный цилиндрический льдоаккумулятор с коаксиальным многосекционным змеевиковым испарителем [35]. Особенностью представленного решения являются вертикально установленные внутри бака полые трубки, имеющие заслонки на дне и крыше аппарата. На верхнем торце каждой из таких трубок установлен вытяжной вентилятор. Заслонки открывают в холодное время года, после чего прокачивают холодный воздух, что приводит к намораживанию льда на внешней поверхности трубок внутри аппарата. Согласно представленному авторами расчету, в холодное время года за счет прокачки через трубки воздуха возможно обеспечить снижение энергетических затрат на 20...50% в зависимости от температурных условий.

Для трубчатых льдоаккумуляторов в некоторой степени интенсифицировать процесс намораживания льда позволяет правильный выбор геометрических соотношений. В работе [36] для льдоаккумулятора с плоскозмеевиковым теплообменным аппаратом установлено оптимальное соотношение межтрубного вертикального шага к диаметру трубок, составляющее $x/d = 1,5$ при котором процесс намораживания проходит эффективнее за ограниченное время.

Главным фактором, сдерживающим широкое распространение льдоаккумуляторов с плавлением льда в объёме жидкости, является низкая интенсивность тепломассообмена в процессе разрядки. Это объясняется малыми значениями коэффициента теплоотдачи при обтекании водой ледового массива. При малых скоростях обтекающей воды значения коэффициента теплоотдачи α не превышают 400~500 Вт/(м²·К) [36]. В застойных зонах, где преобладают условия естественной конвекции, α едва достигает значений 250 Вт/(м²·К) [37].

Ещё одним негативным фактором, влияющим на процесс разрядки аккумуляторов панельного типа [38,39], а также с плоскими трубчатыми

змеевиками, является то, что в процессе плавления происходит увеличение проходного сечения канала и соответствующее снижение скорости обтекания потоком охлаждаемой воды труб или панелей со льдом, что приводит к дополнительному снижению значений коэффициента теплоотдачи [40].

Для интенсификации процесса плавления льда в аппаратах устанавливают различные турбулизаторы [41]. Наиболее распространенным способом турбулизации потока воды в льдоаккумуляторах является применение систем пневматического перемешивания (барботирования) – подачи воздуха в заполненное водой межтрубное пространство. При данном виде интенсификации пузырьки воздуха, поднимаясь и огибая ледовые структуры, создают зоны турбулентности, что локально увеличивает коэффициент теплоотдачи [42].

Согласно данным, приведенным в [43] при описании работы аккумулятора с пневматическим перемешиванием для интенсификации теплосъема в аппарате с размерами бака 6х2х2 м, площадью секций испарителя 80 м² и аккумуляционной способностью 680 кВт·ч, система барботажа включала 2 коллектора подачи воздуха с 65 отверстиями диаметром 1 мм с шагом 0,15 м. Разность температур входа и выхода воды – 5 °С, расход воды – 0,014 м³/с, расчетная скорость воды 0,0011 м/с. Без воздуха время срабатывания составляло около 9 часов при расчетном коэффициенте теплоотдачи 177 Вт/(м²·К). Подача воздуха обеспечила повышение величины расчетного коэффициента теплоотдачи до 580 Вт/(м²·К). Таким образом, удельный расход воздуха на 1 кВт тепловой нагрузки составил 0,18 м³/ч.

В работе Петрова В.И. [44] приведена методика расчета рекомендуемого количества подаваемого воздуха для льдоаккумуляторов.

Коэффициент теплоотдачи в барботажном слое для жидкостей с малым значением вязкости и газосодержанием $\phi_r \leq 0,1$ предложено определять по следующему соотношению:

$$\alpha_{\text{воз}} = 0,048 \rho_{\text{ж}} C_{p\text{ж}} v_{\text{ж}}^{1/2} g^{1/6} w_{\text{г}}^{1/6} L^{-1/3} Pr^{2/3} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \quad (1.1)$$

где $\alpha_{\text{воз}}$ – коэффициент теплоотдачи от воды к поверхности льда при барботаже воздуха, Вт/(м²·К);

$C_{pж}$ – теплоёмкость воды, кДж/(кг·°C);

$\nu_{ж}$ – коэффициент кинематической вязкости воды, м²/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

w_{Γ} – приведенная скорость барботирующего воздуха, м/с;

L – характерный размер (толщина льда для трубки льдоаккумулятора), м;

Pr – число Прандтля для воды.

Приведенная скорость воздуха:

$$w_{\Gamma} = u_{\Gamma} \phi_{\Gamma} \text{ м/с,} \quad (1.2)$$

где u_{Γ} – скорость подъёма пузырьков воздуха в льдоаккумуляторе, м/с;

ϕ_{Γ} – газосодержание:

$$\phi_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}}{V_{ж+\Gamma}}, \quad (1.3)$$

где V_{Γ} – объём воздуха в льдоаккумуляторе, м³;

$V_{ж+\Gamma}$ – Объём смеси воздуха и жидкости в льдоаккумуляторе, м³.

Скорость подъёма пузыря воздушного пузыря:

$$u_{\Gamma} = 1,5 \left(\sigma g \frac{(\rho_{ж} - \rho_{\Gamma})}{\rho_{ж}^2} \right)^{0,25} \text{ м/с,} \quad (1.4)$$

Где σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$\rho_{ж}$ – плотность воды, кг/м³;

ρ_{Γ} – плотность воздуха в пузыре, кг/м³.

Согласно представленной методике расчета, в зависимости от газосодержания ϕ_{Γ} для воды с температурой 5 °C коэффициент теплоотдачи можно увеличить на ~350 Вт/(м²·K) для $\phi_{\Gamma} = 5 \cdot 10^{-6}$ вплоть до ~850 Вт/(м²·K) для $\phi_{\Gamma} = 1 \cdot 10^{-3}$.

По данным компании EVAPCO [45] для обеспечения перемешивания в льдоаккумуляторах данной фирмы используется барботирование с расходом подаваемого воздуха 2 м³/ч на 1 м² площади дна бака льдоаккумулятора.

Ключевым недостатком барботирования является крайне высокая коррозионная активность, что связано с насыщением воды кислородом.

Альтернативный способ турбулизации потока - применение мешалок, однако на сегодняшний день данный способ используется реже, чем

пневматическое перемешивание. В качестве примера рассмотрено устройство аккумулятора холода АКХ на базе панельного испарителя ИП (рисунок 1.18).

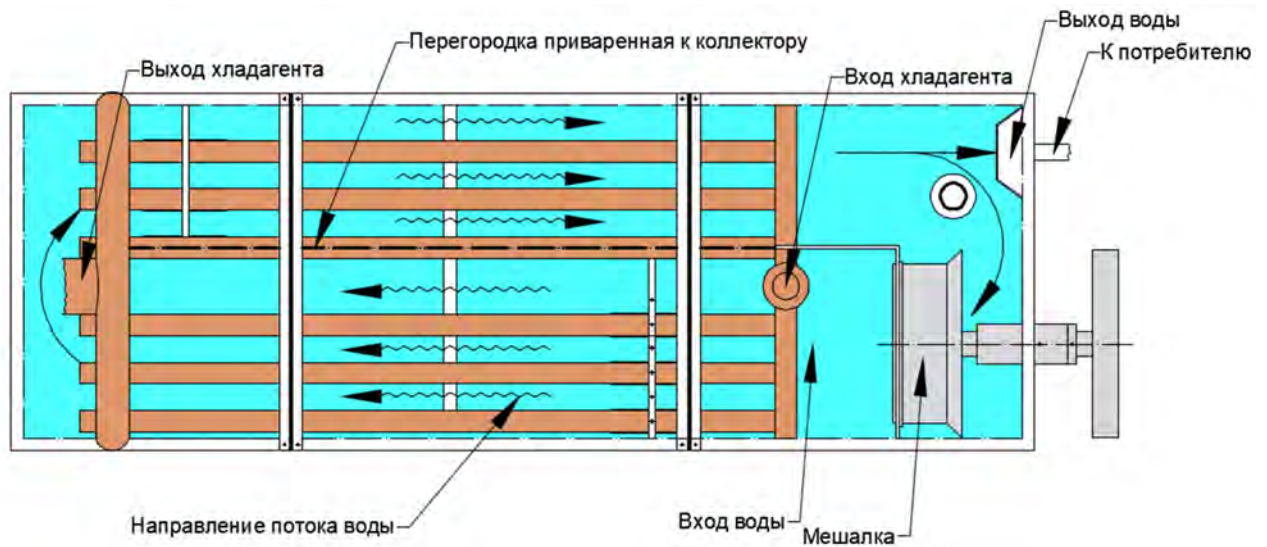


Рисунок 1.18 - Устройство панельного льдоаккумулятора АКХ (вид сверху) и организация распределения воды

В процессе разрядки льдоаккумулятора АКХ вода подается в бак сверху, а затем поток воды направляется мешалкой вдоль панелей аппарата с замороженным льдом. Как видно из представленной схемы, для организации потока совместно применяются мешалка в качестве активного турбулизатора, а также перегородка, что позволяет уменьшить количество застойных зон в аппарате. Таким образом, та часть воды, которая не была отобрана потребителем, продолжает рециркулировать и смешивается с поступающей на охлаждение водой [46]. Подбор характеристик мешалки проводится, исходя из соображений рациональности, поскольку при интенсивном перемешивании затраты электроэнергии на привод мешалки существенно возрастают. В связи с этим, во многих аппаратах с аккумуляцией льда поддерживают скорость потока около 0,2 – 0,5 м/с при этом коэффициент теплоотдачи может увеличиваться до ~ 750 Вт/(м²·К) .

В работе [47] представлены исследования интенсивности теплоотдачи для льдоаккумуляторов серии АКХ. При значениях плотности теплового потока от 0,52 до 2,79 кВт/м² значения коэффициента теплоотдачи составляли от 197 до 709

Вт/(м²·К) при удельных значениях объёмного расхода циркулирующей воды от 0,1 до 0,7 м³/(ч·м²).

Применение специальных устройств для турбулизации потока является энергетически затратным и не позволяет существенно интенсифицировать процесс разрядки. При этом, необходимо отметить, что сам по себе процесс фазового перехода «лёд – вода» является высокоинтенсивным, однако в объёме жидкости темп плавления льда заметно снижается. Для интенсификации процесса плавления необходимо применять другой механизм обтекания ледового массива, обеспечивающий интенсификацию пограничного слоя.

1.4 Оценка возможности применения пленочного механизма обтекания в льдоаккумуляторах

Перспективным подходом для интенсификации процесса тепломассообмена в льдоаккумуляторах с намораживанием льда на поверхности секций является применение пленочного механизма обтекания [48-52].

Пленочное течение – это высокоинтенсивный механизм теплообмена, используемый в пленочных теплообменниках, ректификационных колоннах, скрубберах и иной оросительной технике [53,54]. Значения коэффициентов теплоотдачи в подобных аппаратах нередко превышают 5000 – 7000 Вт/(м²·К).

Изучению процессов пленочного обтекания твердых поверхностей различных конфигураций посвящено значительное число научных работ [55-58]. Основы тепломассообмена и гидродинамики в жидких пленках были заложены В. Нуссельтом, П.Л. Капицей, П.А. Семеновым, С.С. Кутателадзе, В.Г. Левичем [59-61]. В дальнейшем значительный вклад в исследование процессов и аппаратов с использованием пленочного механизма теплообмена внесли Ю.М. Тананайко, З.В. Семилет, В.Г. Риферт, В.Я. Шкадов, Н.В. Товарас.

Плёночное течение представляет собой вид пассивной турбулизации потока, поэтому при прочих равных условиях оно характеризуется существенно более высокой турбулентностью по сравнению с процессами, протекающими в большом объёме или в полностью заполненных каналах. Это обусловлено тем,

что вертикально стекающая плёнка – это активная среда, «накачиваемая» энергией за счёт гравитационных сил. Пленка жидкости, в зависимости от условий, может быть покрыта волнами – синусоидальными, переходящими в трёхмерное беспорядочное движение, а затем – в ударные волны, покрытые сетью вторичных мелких капиллярных волн, дополнительно интенсифицирующих процессы в плёночном слое [62-66].

Теоретическое изучение вопроса свободного течения тонких слоев вязкой жидкости по вертикальной плоскости и стенке вертикальной трубы освещено в работе П.Л. Капицы [67]. Было получено приближенное решение уравнения течения, показавшее, что волновой режим ($30-50 < Re_{пл} < 1500$) устойчивее, чем ламинарный. Была получена форма профиля волны, амплитуда, фазовая скорость, критическая скорость. Полученные теоретические данные в дальнейшем были подтверждены экспериментально. П.А. Семенов проводил опыты по изучению течения жидкостной пленки по вертикальной стеклянной трубе [68]. Параллельно стекающей пленке двигался газ, обладающий абсолютной скоростью, которая значительно (в несколько раз) превышала скорость слоя жидкости. В результате экспериментальных исследований было обнаружено, что поток воздуха со скоростью до 4,5 м/с не влияет на характер стекающей пленки жидкости. В результате обобщения опытов, проведенных П.Л. Капицей и П.А. Семеновым, были установлены закономерности, описывающие стекание тонких пленок жидкости по вертикальным поверхностям.

В.Я. Шкадов проводил научные исследования в области динамики вязких жидкостей [69-72], гидродинамической устойчивости, перехода к турбулентности, пограничного слоя, течений с областями отрыва и с границами раздела, гравитационно-капиллярных течений с тепломассопереносом. Так, в работе [72] представлено исследование развития и устойчивости волнового течения пленки. Было определено, что при оптимальных режимах волнового течения происходит более быстрое развитие волн из малых возмущений ламинарной пленки жидкости.

Пленочное обтекание рядов труб добавляет дополнительную сложность в описание процесса. Это связано с тем, что при горизонтально - отрывном течении воды при обтекании поверхности аппарата трубчатой конфигурации происходит разрушение ламинарного подслоя, что дополнительно интенсифицирует процессы теплообмена, а также значительно влияет на волнообразование. В связи с этим многие теоретические работы по исследованию гидродинамики и теплообмена в тонких плёнках при обтекании трубчатой поверхности выполнены с большим количеством допущений, а экспериментальные результаты различных авторов имеют расхождения от 30 до 200%. (таблица 1.2).

Таблица 1.2 - Коэффициенты теплоотдачи от стенки оросительного теплообменника к стекающей пленке жидкости, полученные различными авторами [53]

Метод определения α	Величина коэффициента теплоотдачи Вт/(м ² ·К) при температуре орошения $t_{op}^{cp} = 20$ °С и диаметре труб $d = 20$ мм				
	$\Gamma=800$ кг/(м·ч)	$\Gamma=850$ кг/(м·ч)	$\Gamma=900$ кг/(м·ч)	$\Gamma=950$ кг/(м·ч)	$\Gamma=1000$ кг/(м·ч)
Ф. Адамс	6082.49	6280.2	6373.24	6570.95	6722.14
И. Плэг	3029.62	3116.84	-	-	-
З.В. Семилет	2064.33	2105.03	2157.37	2203.89	2244.59

Важнейший вклад в изучение пленочного обтекания труб внесла З.В. Семилет. В работе [53] ей было получено аналитическое решение поперечного обтекания трубы пленкой жидкости для диапазона плотностей орошения 220 – 960 кг/(м·ч), температур орошаемой жидкости 11 – 25 °С, диаметров труб 0,012 – 0,03 м и отношений шага к диаметру 2 и 1,7 (рисунок 1.19).

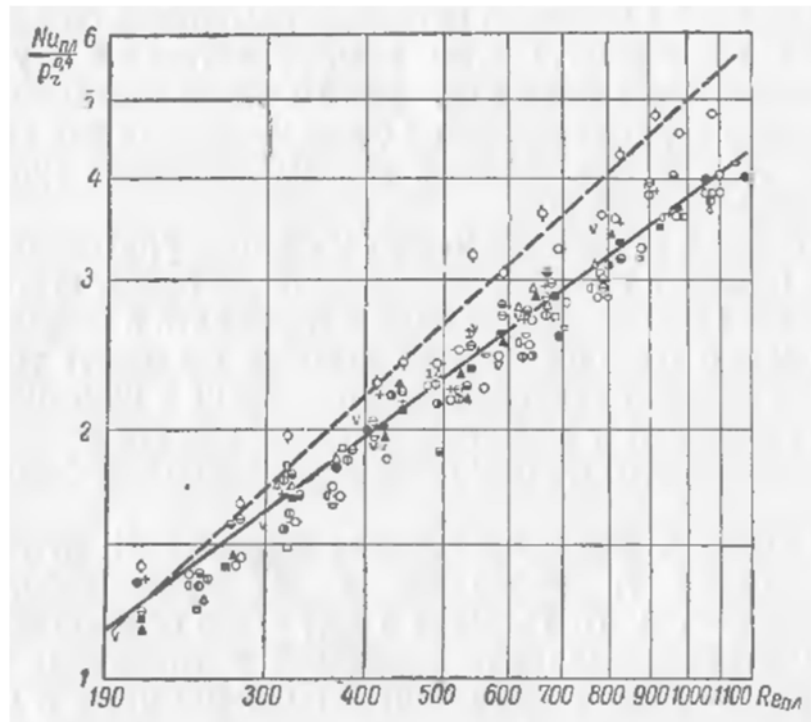


Рисунок 1.19 - Результаты опытов З.В. Семилет, представленные в виде соотношения критериев подобия

Для определения средней толщины пленки при обтекании трубы, согласно З.В. Семилет, предлагается использовать следующую формулу:

$$\delta_{\text{ср}} = 1,447 \sqrt[3]{\frac{\mu \cdot \Gamma}{1200 \cdot \gamma^2}} \text{ м}, \quad (1.5)$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с;

Γ – плотность орошения, кг/(м·ч);

γ – удельный вес, Н/м³.

Важнейшим выводом, полученным в работе [53], является то, что средняя толщина пленки жидкости при поперечном обтекании труб определяется физическими свойствами и расходом жидкости и не зависит от диаметра труб.

В работе [73] проведено экспериментальное исследование теплообмена при горизонтально отрывном обтекания трубки. В результате данного исследования получены значения числа Nu и локального коэффициента теплоотдачи для различных значений угла обтекания трубки Θ (рисунок 1.20).

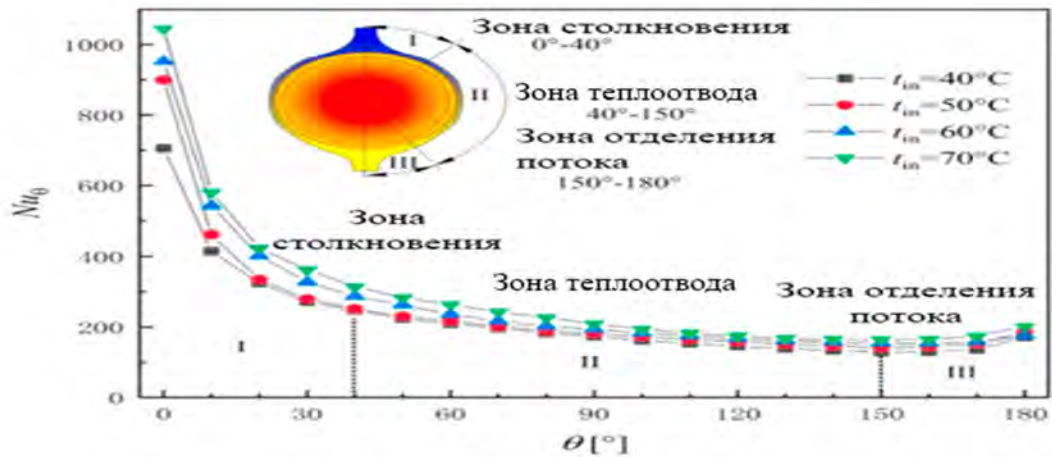


Рисунок 1.20 – Зависимость Nu от угла обтекания Θ для различных температур подаваемой воды t_{in}

В данном исследовании за счет изменения температуры стенки i -го участка трубки с известным значением плотности теплового потока определили интенсивность теплоотдачи для зон с различными значениями угла обтекания Θ . Так во всём диапазоне плотностей орошения Γ (от 0,12 до 0,2 кг/(м·с)) и температур подаваемой воды (от 40 до 70 °С) локальные значения коэффициента теплоотдачи достигали максимума - 17600 Вт/(м²·К) в начальном участке трубы (угол $\Theta = 0^\circ$), в интервале значений Θ от 40 до 150° наблюдалось плавное снижение α , а минимальные его значения (~3200 Вт/(м²·К)) соответствовали углу $\Theta = 150^\circ$ ($Nu = 196$). Как видно из рисунка 1.20, при горизонтально – отрывном типе течения наибольшие значения α достигаются при соударении струи воды с верхней частью трубы (угол $\Theta = 0^\circ$), далее по мере обтекания трубы водой коэффициент теплоотдачи снижался и незначительно увеличился в зоне отрыва пленки (угол $\Theta = 180^\circ$).

Отдельным направлением в изучении пленочных процессов являлось исследование механизма пленочной конденсации. Одним из первопроходцев данного направления считается В. Нуссельт [55,56]. В 1916 г. им была предложена модель, описывающая локальное и среднее значение коэффициента теплоотдачи в зависимости от толщины и температуры на границах ламинарной пленки, стекающей по вертикальной плоскости. Так, среднее значение коэффициента теплоотдачи можно определить исходя из формулы:

$$\bar{\alpha}_N = 0,943 \sqrt[4]{\frac{\lambda_{\text{ж}}^3 r g \Delta \rho}{\Delta t \nu_{\text{ж}} H}} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \quad (1.6)$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ – средняя теплопроводность конденсата, Вт/(м·К);

r – удельная теплота конденсации, Дж/кг;

g – ускорение свободного падения м/с²;

$\Delta \rho$ – разность плотностей конденсата и пара, кг/м³;

Δt – разность температур пара и стенки, К;

$\nu_{\text{ж}}$ – кинематическая вязкость конденсата, м²/с;

H – высота плоскости или трубы, м.

Предложенная Нуссельтом модель стала отправной точкой для дальнейших исследований. Теорию пленочной конденсации продолжили исследования Г. Вюшна, Д.А. Лабунцова, Г.Н. Кружилина и др. Результатом проведенных опытов и исследований стала разработка и создание высокоэффективных пленочных аппаратов, применяемых в различных видах промышленности. В работе [74] в результате анализа процессов конденсации было показано, что значения коэффициента теплоотдачи в горизонтальных пленочных конденсаторах достигают 4000 – 6000 Вт/(м²·К), а в вертикальных пленочных конденсаторах – 8000 – 11000 Вт/(м²·К). В работе представлены две расчетные модели конфигураций пленочных конденсаторов. В первой модели учитывалось два механизма теплопередачи: конвективная конденсация и пленочная конденсация, которые рассчитывались численными методами. Во второй модели конденсация в вертикальной трубе рассчитывалась в соответствии с теорией пленочной конденсации для вертикальной пластины. Полученные значения коэффициентов теплоотдачи составили 5000 и 8000 Вт/(м²·К), что хорошо коррелирует с экспериментальными данными.

С физической точки зрения задача пленочного обтекания ледовых структур имеет некое родство с задачей пленочной конденсации [75]. В случае пленочной конденсации важную роль играет разность температур, т.е. чем холоднее поверхность, на которую оседает конденсат, тем интенсивнее идет процесс фазового перехода и тем интенсивнее нарастает термическое сопротивление за

счет увеличения толщины конденсатной пленки [76]. Можно ожидать, что и для пленочного плавления льда градиент температур будет оказывать решающее влияние.

Несмотря на определенные предпосылки, в открытых литературных источниках практически нет подробной информации по пленочному обтеканию плавящихся, в частности, ледовых структур. Наиболее близкой к данной тематике является работа Виноградова В.Н. и Гончаровой Г.Ю. [77]. В данной работе рассматривается пленочное обтекание ледяного массива, замороженного в льдохранилище в условиях естественного холода. Приводятся рекомендации и методика расчета основных параметров льдохранилища. Авторами также представлена функция, аппроксимирующая отношение экспериментальных значений коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}_{\text{эксп}}$ с фазовым превращением, к значениям, представленным в литературе $\bar{\alpha}_{\text{теор}}$ при отсутствии фазового перехода. Так, для диапазона объемной плотности орошения Γ_v от $1 \cdot 10^{-4}$ до $10 \cdot 10^{-4}$ м²/с значения $\bar{\alpha}_{\text{эксп}}$ можно вычислить по формуле:

$$\bar{\alpha}_{\text{эксп}} = \bar{\alpha}_{\text{теор}} \cdot (\Gamma_v^\delta \cdot 10^4)^{0,575} \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}, \quad (1.7)$$

где Γ_v^δ – безразмерный коэффициент, численно равный объемной плотности орошения Γ_v .

Исследования, представленные в работе показали, что при значениях Γ_v более $4 \cdot 10^{-4}$ м²/с в разработанном льдохранилище плотность теплового потока составляла от 40 до 80 кВт/м². При высокой ценности и важности полученных результатов, в данной работе не представлено их обобщение в виде критериальных уравнений. Это позволило бы адаптировать результаты для подобных систем охлаждения различного масштаба.

Отсутствие аналитических решений и малое число экспериментальных работ по пленочному обтеканию ледовых структур можно объяснить высокой степенью нестационарности процесса, интенсивным стохастическим изменением площади обтекаемой поверхности и добавлением фракции расплава в стекающую пленку жидкости. Необходимо отметить, что у различных авторов даже значение

критического числа Re существенно разнится для различных значений плотностей орошения вертикально стекающей пленки. По данным Е.Г. Воронцова и Ю.М. Тананайко [54] критическое число Re колеблется в диапазоне значений от 400 до 3200 у разных авторов. Для гравитационных пленок, орошающих гладкие вертикальные поверхности критическое число Re составляет 1600. В случае же пленочного обтекания ледовых структур локальное число Рейнольдса будет существенно изменяться по мере обтекания ледового массива.

1.5 Математическое моделирование процессов с фазовым переходом и различными видами течения.

Описать процесс пленочного обтекания ледовых поверхностей возможно при помощи численного моделирования. Подобная математическая модель должна включать в себя совместное решение задачи Стефана и уравнений Навье – Стокса, адаптированных к течению тонкой пленки.

Под задачей Стефана понимают класс математических моделей, описывающих тепловые, диффузионные и термодиффузионные процессы, сопровождающиеся фазовыми превращениями среды и поглощением или выделением скрытой теплоты с изменяющейся границей тепломассообмена. Особенностью этих процессов являются неизвестные заранее («свободные») границы между различными фазами (в случае однородного вещества) или «многофазная зона» (в многокомпонентной среде) [78-81].

Так, в работе [78] представлено численное моделирование двумерного ледового острова. Составлены условия и сформулирована задача Стефана. Граничными условиями являлась постоянная температура в зоне контакта с воздухом, грунтом и водой минус 40, плюс 3 и плюс 5 °С соответственно. Расчёт проводился для временного промежутка 150 дней. Дополнительно в некоторых режимах в данной работе учитывалось смешивание воды. В результате проведенного исследования авторами установлено изменение границы раздела фаз и определены значения температур в толще массива льда (рисунок 1.21).

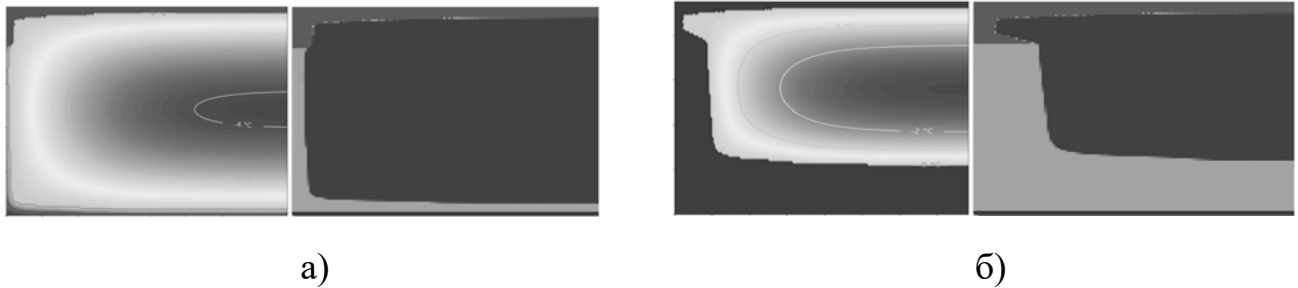


Рисунок 1.21 – численное моделирование ледового острова

а) без учета смешивания воды; б) с учетом смешивания воды

В статье [79] представлена модификация метода переменного временного шага (англ. *modified variable time step method*) для решения задачи плавления ледового цилиндра. Сутью предложенного метода является прослеживание перемещения границы раздела фаз на фиксированное расстояние Δx и адаптация под это перемещение временного промежутка Δt , на котором происходит расчет. Данный метод позволяет избежать увеличения сложности и потери точности в связи с неравными пространственными интервалами вблизи движущейся границы. В работе [81] представлено численное моделирование двухфазной задачи Стефана для плавления и испарения вольфрама при импульсном воздействии лазером. В результате решения численной модели авторы обнаружили, что мгновенный нагрев пластинки до 9000 К за счет воздействия на её поверхность теплового потока и последующее охлаждение сопровождались возникновением и исчезновением области расплава. Так же было установлено влияние испарения металла в процессе нагрева, не позволявшее вольфраму нагреваться свыше 9000 К. Полученные результаты хорошо коррелировали с экспериментальными данными.

Вторая часть модели, описывающей пленочное обтекание ледового массива, состоит из адаптации уравнений Навье – Стокса. В случае турбулентного потока для описания явлений, происходящих в тонком слое, можно воспользоваться уравнениями движения вязкой жидкости осреднёнными по Рейнольдсу (RANS). Метод осреднения Рейнольдса заключается в замене случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осреднённых и пульсационных составляющих. Существует значительное количество моделей

турбулентного течения, позволяющих в той или иной мере обеспечивать моделирование жидкости или газа в зависимости от условий и требований, предъявляемых к модели [82]. Наиболее подходящими моделями для турбулентного пленочного обтекания поверхностей жидкостью можно считать модели $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ и их модификации (например, RKE – realizable $k - \varepsilon$ модель). В Модели $k - \varepsilon$ система уравнений преобразуется к виду, в котором добавлено влияние флуктуации средней скорости (в виде турбулентной кинетической энергии) и процесса уменьшения этой флуктуации за счёт вязкости (диссипации). В данной модели решается 2 дополнительных уравнения для транспорта кинетической энергии турбулентности и транспорта диссипации турбулентности. При этом недостатком данной модели является сложность описания пристеночных явлений при высоких значениях чисел Рейнольдса. В модели $k - \omega$ решается уравнение для скорости диссипации турбулентной энергии. Данная модель требует меньших размеров сетки (что приводит к увеличенной длительности расчета), а конечный результат решения в значительной степени зависит от начального приближения, однако данная модель качественно описывает пристеночный слой жидкости.

В работах [83-85] проводится сравнение различных моделей RANS, в том числе и для описания пленочного течения. Авторами работы [83] проведено сравнение RKE модели, стандартной $k - \omega$ модели и модели Рейнольдсовых напряжений (RSM) для пленки жидкости. В результате исследований авторами определено, что адиабатическое охлаждение пленки жидкости, стекающей по пластине, наилучшим образом описывается стандартной $k - \omega$ моделью. В работе [84] проведено сравнение стандартной $k - \varepsilon$ и RKE моделей для условий потока в каналах с изменяющейся геометрией (русло реки). Установлено, что обе модели хорошо коррелируют с экспериментальными исследованиями, однако стандартная $k - \varepsilon$ модель лучше описывала профиль скоростей и пристеночные явления. Для решения задачи пленочного обтекания возможно применение модели Transition SST, также известной как γ -Re θ модель [86]. Она основана на модели переноса касательных напряжений Флориана Ментера (SST), которая

использует k - ϵ модель для расчёта ядра потока и k - ω модель для расчёта пристеночных явлений. Отличием γ - $Re\theta$ модели является введение двух дополнительных уравнений переноса, одно для перемежаемости турбулентности, а второе для критерия начала перехода в единицах толщины потери импульса чисел Рейнольдса. Таким образом, удаётся избежать завышения уровня турбулентности в застойных зонах и областях с высокими ускорениями, что является основным недостатком стандартной SST k - ω модели [87,88].

Несмотря на теоретическую возможность проведения численного моделирования плавления ледовых структур, обтекаемых тонкой пленкой, в открытых литературных источниках не представлено решения такой задачи.

1.6 Применение льдоаккумуляторов на объектах пищевой промышленности

В настоящий момент решения с применением технологии льдоаккумуляции являются актуальными и востребованными на многих объектах пищевой промышленности, в особенности, характеризующихся неравномерностью распределения тепловой нагрузки:

1. В мясной промышленности ЛА применяются в составе СКВ, а также при иммерсионном и воздушнокапельном охлаждении тушек птицы [89].
2. В хлебопекарной промышленности подобные аппараты используют для получения ледяной воды, необходимой в замесе теста [90].
3. ЛА применяются на заводах по производству соков и концентратов, при переработке фруктов, ягод и овощей [91].
4. В молочной промышленности ледяная вода используется при приемке молока и при производстве:
 - молока, сливок: пастеризация молока, настаивание, охлаждение и упаковка сливок и аналогичной продукции, готовой к употреблению;
 - сыра: в холодильных камерах, где сыр укладывается для созревания;
 - мороженого: хранение пастеризованной смеси для мороженого при 4 °С.
5. В пивоваренной промышленности ЛА применяются для охлаждения сусла.

Наибольшее распространение ЛА получили на объектах молочной и пивной промышленности. Применение ледяной воды при приёмке молока, объясняется требованиями, предъявляемыми к процессу его охлаждения. Так, согласно ГОСТ 31449-2013 [92] свежесвыдоенное коровье молоко должно быть охлаждено до температурного уровня $(4 \pm 2) ^\circ\text{C}$ и должно удовлетворять требованиям, представленным в таблицах 1.3 и 1.4

Таблица 1.3 - Органолептические характеристики свежего коровьего молока

Наименование показателя	Характеристика
Консистенция	Однородная жидкость без осадка и хлопьев
Вкус и запах	Чистый, без посторонних запахов и привкусов, не свойственных свежему молоку. Допускается слабовыраженный кормовой привкус и запах
Цвет	От белого до светло-кремового

Таблица 1.4 - Физико – химические и микробиологические показатели свежего молока

Наименование показателя	Значение показателя
Массовая доля жира, %, не менее	2,8
Массовая доля белка, %, не менее	2,8
Кислотность, °Т	От 16,0 до 21,0 включительно
Массовая доля сухих обезжиренных веществ молока (СОМО), %, не менее	8,2
Группа чистоты, не ниже	II
Плотность, кг/м^3 , не менее	1027,0
Температура замерзания, °С, не выше минус	0,520
Содержание соматических клеток в 1 см^3 , не более	$4,0 \cdot 10^5$
КМАФАнМ*, КОЕ**/ см^3 , не более	$1,0 \cdot 10^5$

* Количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов. ** Колониеобразующие единицы.

Для обеспечения сохранности качества молока и молочной продукции необходимо проводить мероприятия по первичной холодильной обработке. Необходимость интенсивного охлаждения молока связана с особенностями биологических и физико–химических процессов, происходящих в нем сразу после его получения. Сырое молоко может содержать различную микрофлору: молочнокислые бактерии, бактерии группы кишечной палочки, споровые и не споровые палочки, микрококки и стафилококки. Микрофлора молока развивается в несколько фаз. Бактерицидная фаза характеризуется тем, что непосредственно после дойки в молоке не происходит интенсивного размножения микроорганизмов благодаря воздействию на них лактенинов, лизоцимов и лактопероксидазы. Охлаждение коровьего молока не позднее двух часов с момента его получения до температурных уровней не выше $4 \pm 2^{\circ}\text{C}$ позволяет продлить бактерицидную фазу до 36 – 48 часов. В противном случае будет происходить развитие смешанной микрофлоры за счет микроорганизмов, попавших в молоко. При последующем повышении кислотности происходит отмирание молочных стрептококков и дальнейшее развитие молочнокислых бактерий с меньшей чувствительностью к кислотности среды. Вследствие этого значение кислотности pH в молоке повышается и создаются условия для размножения маслянокислых и гнилостных бактерий, что приводит к порче молока [93].

Кроме применения систем с намораживанием искусственного льда существуют и иные способы охлаждения молока, которые, однако, обладают рядом определенных недостатков:

- 1) Наиболее простым способом охлаждения и последующего хранения молока в весенне-летний период является использование хранилищ, заполненных льдом, который заготавливают зимой. Этот способ предусматривает погружение бидонов с продуктом в бассейны со льдом, через который пускают проточную воду. Лед берется в чистых водоемах, из расчета 1 м^3 на 1 тонну молока [94]. При этом недостатком данного подхода является зависимость от естественного холода,

необходимость подготовки льда, а также создание теплоизолированного ледового склада, что крайне ограничивает использование подобного подхода.

2) В случае применения машинного охлаждения возможно применение двухступенчатой и одноступенчатой схем охлаждения. При двухступенчатой схеме охлаждения в пластинчатом охладителе при помощи проточной артезианской воды обеспечивают охлаждение молока до температуры 15...17 °С, а затем проводят доохлаждение в резервуаре-охладителе [95]. При этом в данном способе расходуется энергия на насосы для подачи воды, а также требуется наличие скважины. При использовании одноступенчатой технологии охлаждения с применением резервуаров – охладителей (танков) молоко поступает в специальные ёмкости с фреоновой рубашкой, где впоследствии охлаждается с 35 °С до 4 °С в течение нескольких часов. Преимуществами данного способа являются простота обслуживания, относительно низкая стоимость и компактность оборудования. При этом существенным недостатком является длительность охлаждения, что нивелирует положительные качества данной технологии. Дополнительным негативным фактором является возможность подмораживания молока при низких температурах кипения фреона, что приводит к снижению качества охлаждаемого продукта [96].

3) Следующей технологией для охлаждения молока является применение чиллеров, охлаждающих воду, которая подается в пластинчатый теплообменный аппарат для дальнейшего охлаждения потока молока. Ключевым недостатком применения чиллеров в данном случае является необходимость подбора холодильной установки по пиковым значениям тепловой нагрузки на охлаждаемом объекте, что приводит к увеличению капитальных затрат, в связи с удорожанием стоимости холодильного оборудования по сравнению с технологиями охлаждения, включающими в себя льдоаккумуляцию. Помимо этого, применение чиллеров для получения ледяной воды на предприятиях с ярко выраженным пиковым характером тепловых нагрузок не оправдано с позиции эксплуатационных затрат. Для обеспечения регулирования производительности

чиллеров могут применяться частотные преобразователи, что, однако, увеличивает стоимость холодильной системы [97,98].

С учетом перечисленных способов охлаждения можно сказать, что применение льдоаккумуляторов является наиболее рациональным подходом при первичной холодильной обработки молока.

Важным направлением применения технологии льдоаккумуляции является пивоваренная промышленность. В частности, ледяная вода, полученная в процессе плавления льда в льдоаккумуляторе, может быть использована для охлаждения сусла. Как правило, охлаждение сусла для пива происходит в течение 60 - 90 минут с температурного уровня около 90 °С до температуры 6...8 °С. На сегодняшний день широко применяются схемы одноступенчатого и двухступенчатого способов охлаждения.

В одноступенчатом цикле охлаждения горячее сусло сразу охлаждается при помощи ледяной воды с температурой 0...2 °С .

Охлаждение с использованием двухступенчатого охладителя позволяет отводить теплоту в одном аппарате, имеющем две отдельные ступени. Так, на первой ступени охлаждения сусло после варки охлаждается за счет потока воды, поступающего на варку. Это, с одной стороны позволяет рекуперировать тепло горячего сусла, а с другой, подготовить воду для использования в дальнейшей варке сусла. После этого сырье поступает на вторую ступень охлаждения, где оно доохлаждается при помощи ледяной воды. Альтернативным решением, встречающимся в промышленности, является применение на второй ступени в качестве охлаждающей жидкости водного раствора пропиленгликоля [99,100]. Применение данного хладоносителя подразумевает использование чиллеров, при этом теряются все преимущества, предлагаемые технологией льдоаккумуляции.

Согласно материалам, представленным в работе [101], при двухступенчатом способе охлаждения сусла при объеме варки 400 гл/час мощность требуемой системы хладоснабжения составляет 140 кВт. При одноступенчатом процессе при том же объеме варки — мощность оборудования с использованием ледяной воды составляет 400 кВт. Подобные тепловые нагрузки наиболее рационально отводить

с использованием систем хладоснабжения, включающих в себя льдоаккумуляторы.

1.7 Выводы по обзору научно – технической литературы

По результатам проведенного обзора можно сделать следующие основные выводы:

1. Применение водного льда в пищевой промышленности, как наиболее эффективного, безопасного и экологически чистого вещества для аккумуляции холода на температурном уровне $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ крайне актуально.
2. Основные причины, сдерживающие широкое распространение льдоаккумуляторов объёмного типа плавления до настоящего времени, заключаются в весьма низкой интенсивности плавления льда в большом объёме жидкости т.е. малой интенсивности съёма накопленной энергии и связанным с этим повышением температуры воды на выходе из аппарата.
3. На сегодняшний день в открытых источниках не представлено критериальных уравнений и математических моделей, описывающих задачу пленочного обтекания с плавлением замороженного на них льда.
4. Пленочное течение является крайне интенсивным механизмом теплоотдачи. Применение пленочного обтекания в льдоаккумуляторах открывает новые перспективы за счет эффекта эмерджентности двух факторов: пленочного обтекания и фазового перехода.
5. Технология льдоаккумуляции активно применяется на объектах пищевой промышленности.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ОБТЕКАНИЯ ЛЕДОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ

2.1 Экспериментальные исследования тепломассообменных процессов в коаксиальном пленочном льдоаккумуляторе

2.1.1 Состав экспериментального стенда

Основное влияние на интенсивность тепломассобмена между замороженным льдом и охлаждаемой водой в льдоаккумуляторе оказывает ламинарный подслои, образующийся в процессе плавления льда в объеме жидкости. Таким образом, льдоаккумуляторы объемного типа плавления, как отмечалось ранее, не позволяют в полной мере справиться с пиковыми или нештатными тепловыми нагрузками. В связи с этим, одной из задач работы было проектирование и создание аппарата, обеспечивающего существенно более высокую интенсивность теплообмена и возможность симметричного ответа на динамическую тепловую нагрузку.

На стадии проектирования, автором, исходя из ряда преимуществ, была выбрана трубчатая конфигурация льдоаккумулятора башенного типа, обеспечивающая возможность проведения исследований, как в пленочном, так и объемном режимах плавления. Процесс изготовления, а также различные пуско – наладочные работы представлены в приложении на рисунках П1.1 – П1.7. Сконструированный льдоаккумулятор представляет собой прозрачный кожух, выполненный из органического стекла для обеспечения возможности наблюдения и видеофиксации процессов намораживания и плавления льда, с установленным в нём змеевиковым испарителем. Подача хладагента в испаритель производится при помощи дистрибьютера (распределителя) обеспечивающего равномерное поступление в две коаксиальные секции. Каждая секция состоит из двух U – образно соединенных змеевиков, диаметры которых обеспечивают идентичные длины труб и гидравлическое сопротивление. Наружный диаметр труб - 12,7 мм, суммарная площадь поверхности змеевиков - 1 м² при общих габаритах

испарителя 285x1100 мм. Представленная конфигурация обеспечивает компактность за счет рационального соотношения вертикального шага к диаметру трубки $x/d = 1,5$. Для минимизации свободного пролёта и равномерного распределения, подаваемой при помощи форсунки охлаждаемой воды, было выбрано шахматное расположение трубок и установлен конический отбойник. Спроектированный и изготовленный пленочный ЛА представлен на рисунке 2.1

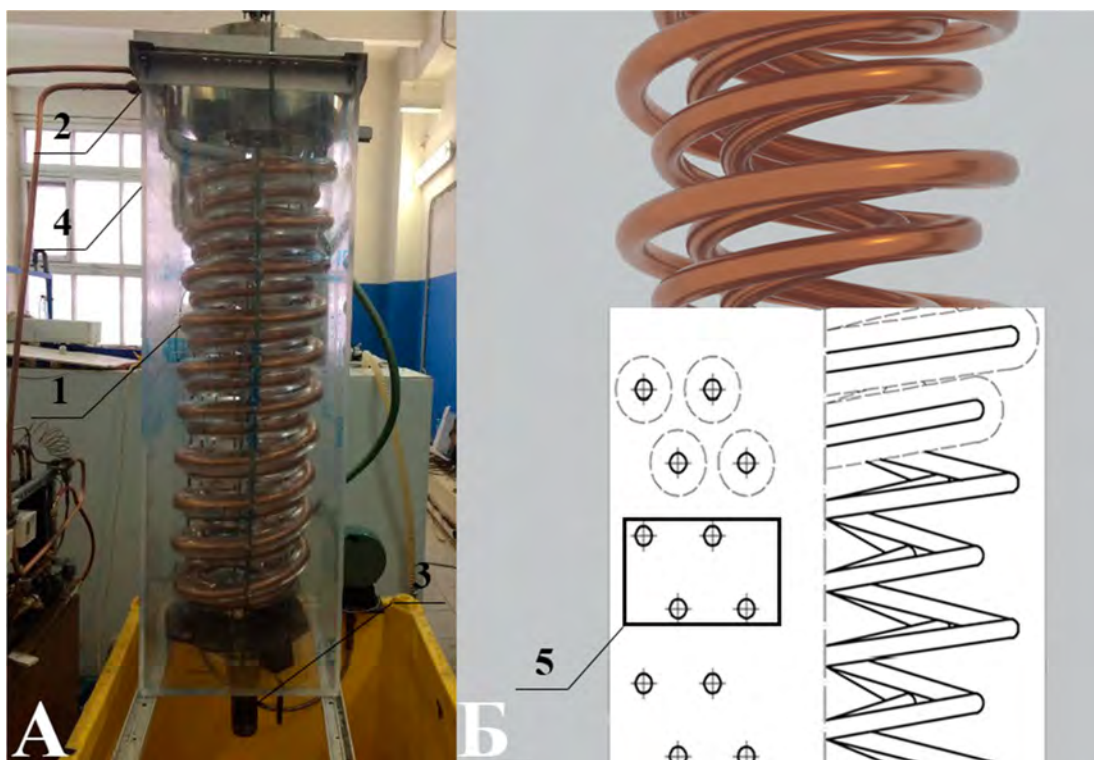


Рисунок 2.1 - Пленочный льдоаккумулятор

А – внешний вид ЛА; Б – схематичное изображение;

1 – льдоаккумулятор, 2 – распределитель фреона, 3 – сливной вентиль, 4 – кожух из оргстекла, 5 – шахматное расположение трубок змеевиков.

Для обеспечения возможности проведения комплекса экспериментальных исследований пленочного обтекания ледовых поверхностей в широком диапазоне расходов (плотностей орошения) и температур подаваемой воды во «ВНИХИ» – филиале ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В.М. Горбатова» РАН был создан экспериментальный стенд (рисунок 2.2).

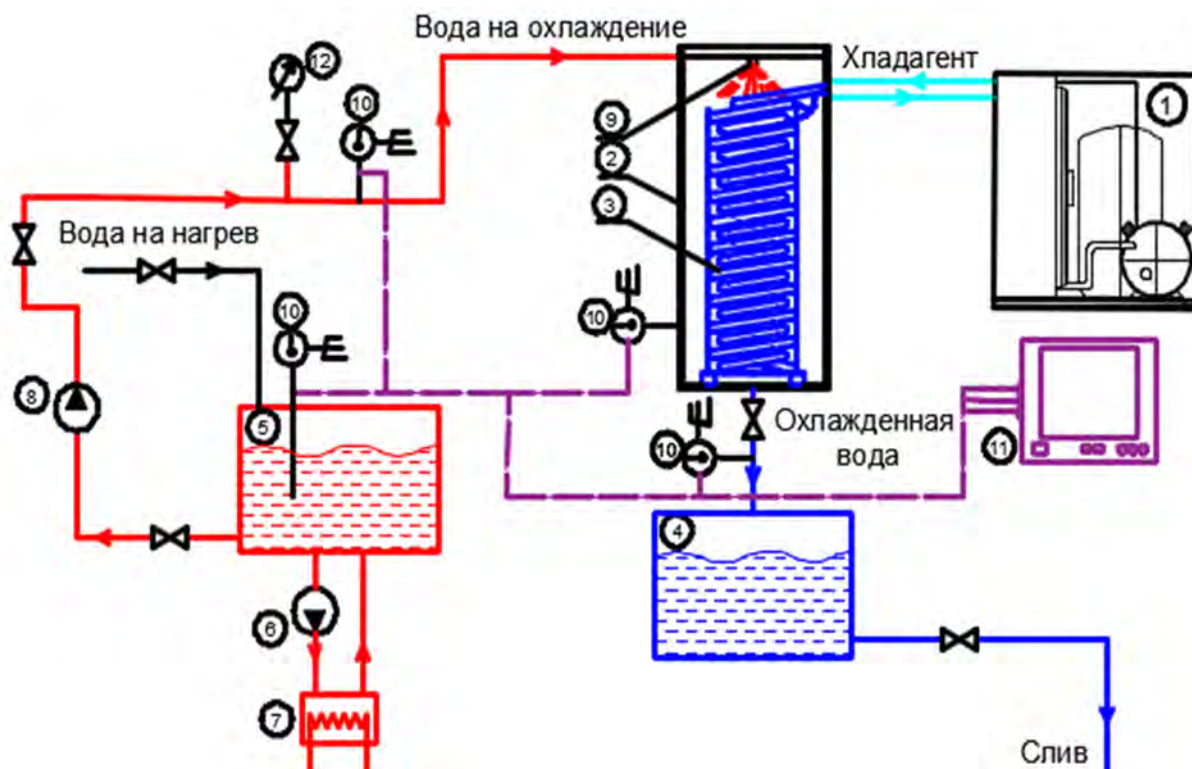


Рисунок 2.2 - Принципиальная схема экспериментального стенда

Основными элементами экспериментального стенда являются: 1 - Компрессорно-конденсаторный агрегат, льдоаккумулятор, состоящий из кожуха 2 с установленным в нём испарителем 3, 4 – сливной бак, 5 – бак накопитель, 6 – циркуляционный насос, 7 – проточный водонагреватель, 8 – насос с частотным преобразователем, 9 – форсунка, 10 – датчики температуры, 11 – многоканальный регистратор, 12 – манометр.

Основные характеристики пленочного ЛА представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Основные характеристики разработанного аппарата

Параметр	Значение
Общая длина трубной системы аппарата, м	26
Площадь внешней трубной поверхности испарителя, м ²	1,03
Наружный диаметр трубки змеевика d, мм	12,7
Масса намораживаемого льда на всем аппарате, кг	32±1

Продолжение таблицы 2.1

Толщина намораживаемого льда, мм	15±1
Число витков в одном змеевике	10
Количество змеевиков в аппарате	4
Диаметр первого змеевика D1, мм	285
Диаметр второго змеевика D2, мм	231
Диаметр третьего змеевика D3, мм	178
Диаметр четвертого змеевика D4, мм	125

Для измерения температуры воды после обтекания намороженного льда под каждым слоем витков наружного змеевика льдоаккумулятора в одной плоскости по вертикали были установлены датчики температуры (рисунок 2.3).

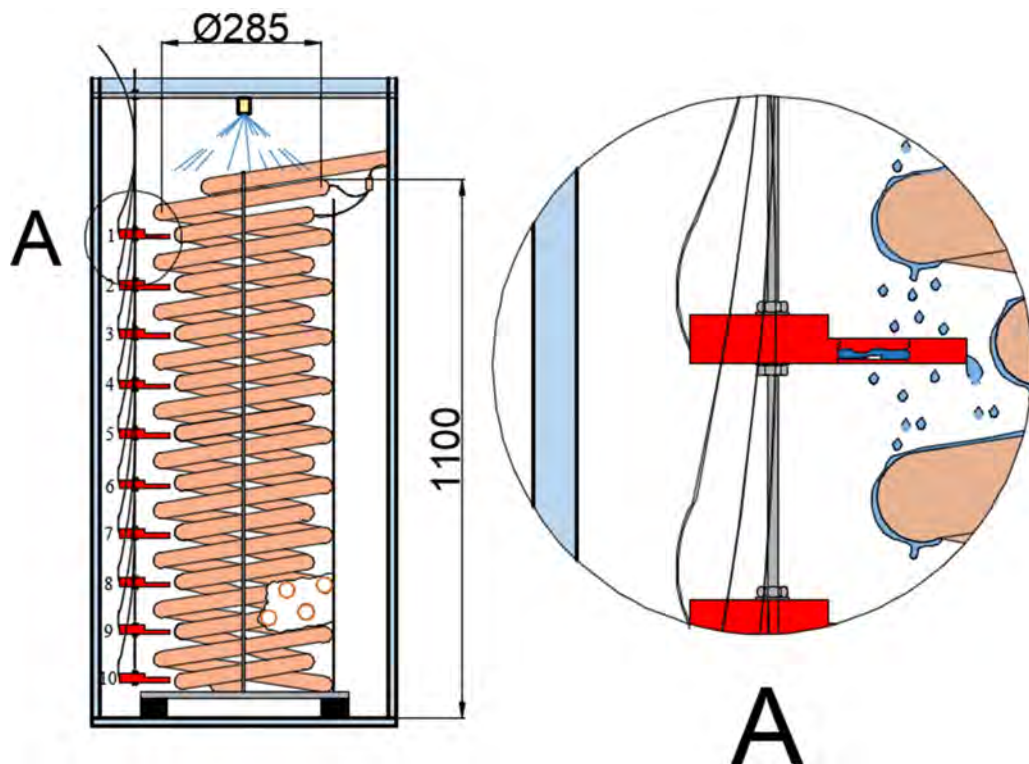


Рисунок 2.3 - Расположение датчиков температур в коаксиальном ЛА. Местным разрезом представлен слой витков.

Датчики температуры также были установлены на входе и выходе из аппарата. Это позволило получить полную картину распределения температур охлаждаемой в аппарате воды по мере плавления льда в процессе разрядки аппарата. Измерение

температуры воды проводилось термометрами сопротивления с платиновыми чувствительными элементами модификации ЧЭПТ – 19-2 (рисунок 2.4 а), подключенными к многоканальному технологическому регистратору РМТ 59L (рисунок 2.4 б).



а)



б)

Рисунок 2.4 - Средства измерения температуры охлаждаемой воды

а) Платиновый чувствительный элемент Pt100 модификации ЧЭПТ 19-2; б)
регистратор измеритель РМТ 59L

Допуск по ГОСТ 6651-2009 для регистратора класса точности «В» составляет $\pm(0,3+0,005|t|)$ °С. В связи с высокой степенью нестационарности процессов, происходящих при пленочном плавлении льда, для получения наиболее полной информации была установлена частота опроса датчиков составляющая 1 Гц. Тепловая инерция данных датчиков составляет менее 1 с.

Для обеспечения необходимых значений расходов был установлен моноблочный многоступенчатый насос Calpeda МХН 406/А горизонтального типа, позволяющий перекачивать жидкости с температурой от минус 15 °С до плюс 110 °С с расходом от 2,25 до 8 м³/ч и давлением до 0,6 МПа. Расход воды, подаваемой насосом, регулировался при помощи векторного преобразователя частоты ОВЕН ПЧВ 102-2К2-В. Значение частоты тока, соответствующее нужному расходу подаваемой на охлаждение воды, находили опосредованно, опытным путем, при помощи весового метода. Измерение массы воды

проводилось с помощью лабораторных весов СВХ второго класса точности ценой деления 0,1 грамма с диапазоном 0 – 30 кг. Соответствие расхода подаваемой на охлаждение воды от частоты тока частотного преобразователя подтверждалось показаниями манометра, установленного на линии подачи воды. В качестве нагревательных элементов использовались электронагреватели с суммарной мощностью 6 кВт с шаговым регулированием по 1,5 кВт. Холодопроизводительность установки, работающей на хладагенте R22 и обеспечивающей намораживание льда, составила 3 кВт при температуре кипения минус 10°C и ~ 2 кВт при температуре кипения минус 18°C.

2.1.2 Методика проведения исследований

В соответствии с выбранной схемой проведения экспериментальных исследований изменение параметров работы ЛА проводилось в соответствии с методом покоординатного спуска в следующей последовательности:

- 1) Для фиксированного расхода с температурой подаваемой воды 20, 40 и 60°C.
- 2) Для фиксированной температуры с расходами 0,25, 0,5, 0,75, 1 кг/с, что соответствовало $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-4}, 1 \cdot 10^{-4}, 1,5 \cdot 10^{-4}, 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}$.

Эксперименты по исследованию пленочного теплообмена завершали по достижении температуры на выходе из аппарата 12 °C, что соответствует верхнему порогу температурного уровня технологического кондиционирования.

Всего было проведено более 300 экспериментов с различными режимами плавления замороженного льда: пленочное плавление, объемное плавление, объемное плавление с применением барботирования.

2.1.3 Подготовка и проведение эксперимента

Перед проведением экспериментов производилась калибровка форсунки, обеспечивающей равномерное распределение подаваемой воды на поверхность льдоаккумулятора. Выставлялось нужное значение частоты тока на частотном преобразователе, при этом пуска насоса не производилось.

1. Проведение процесса **зарядки** льдоаккумулятора.

1.1 Ёмкость льдоаккумулятора заполнялась водой до тех пор, пока испаритель ЛА не был полностью погружен под воду. После этого производилось включение холодильной установки. В процессе намораживания масса ледового массива фиксировалась опосредовано, за счет изменения уровня столба воды в баке льдоаккумулятора. Полная зарядка льдоаккумулятора соответствовала повышению столба воды на 20 мм. По достижении необходимой массы льда холодильную установку отключали.

1.2 Перед проведением экспериментальных исследований в пленочном режиме плавления оставшуюся после процесса зарядки ледяную воду сливали в бак, установленный под ЛА.

1.3 Для обеспечения требуемой температуры воды, подаваемой на охлаждение в ЛА, включали циркуляционный насос и подавали питание на ТЭНы. Динамику изменения температуры воды в баке - накопителе отслеживали по изменению показаний датчика температуры расположенного на дне бака и подключенного к регистратору. По достижении необходимой температуры ТЭНы и насос отключали.

2. Проведение процесса **разрядки** льдоаккумулятора.

2.1 На регистраторе включали режим записи показаний датчиков температуры.

2.2. а) При проведении эксперимента в пленочном режиме плавления сливной вентиль открывали полностью.

2.2.б) При проведении эксперимента в режиме работы объёмного плавления, пуск охлаждаемой воды проводили совместно с открытием сливного вентиля, который регулировали таким образом, чтобы обеспечить постоянный уровень воды в льдоаккумуляторе.

2.2.в) В случае проведения экспериментальных исследований с применением пневматического перемешивания, дополнительно включали воздушный компрессор.

2.3 Производили пуск насоса.

2.4 В процессе проведения экспериментов проводились измерения температуры воды на входе, выходе и после каждого слоя витков.

2.5 По достижении температуры охлаждаемой воды на выходе из ЛА 12 °С эксперимент прекращали. Насос отключали.

2.6 Производилось отключение записи регистратора.

2.7 а) По окончании эксперимента с объёмным плавлением оставшуюся воду из льдоаккумулятора сливали.

2.7 б) После проведения эксперимента с барботированием воздушный компрессор отключали.

2.8 Данные по изменению температуры в процессе разрядки ЛА копировали с регистратора на USB Flash накопитель.

2.1.4 Методика обработки экспериментальных данных

Записанные на USB Flash накопителе данные расшифровывались при помощи программы DataViewStudio (рисунок 2.5), что в дальнейшем позволяло перевести данные в среду программного обеспечения (ПО) Microsoft Excel.



Рисунок 2.5 - Графический интерфейс программы DataViewStudio

Объёмная плотность орошения для каждого значения расхода находилась по следующему соотношению:

$$\Gamma_{vi} = \frac{G_{vi}}{\rho_{vi} \cdot \Pi \cdot 2} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (2.1)$$

где G_{vi} – массовый расход подаваемой воды, кг/с;

ρ_{vi} – плотность воды, кг/м³;

Π – смоченный периметр, равный суммарной длине труб слоя витков, м;

Тепловая нагрузка для всего аппарата определялась по тепловому балансу продукционной воды в соответствии с квазистационарной моделью: процесс разрядки разбивался на элементарные отрезки по времени, в течение которых измеряемые параметры считались постоянными и равными средним значениям за период.

$$Q_i = G_{vi} \cdot (Cp_{vxi} \cdot t_{vxi} - Cp_{vxi} \cdot t_{vxi}) \text{ Вт}, \quad (2.2)$$

Cp_{vxi} – удельная теплоёмкость воды на входе, Дж/(кг·°C);

Cp_{vxi} – удельная теплоёмкость воды на выходе, Дж/(кг·°C);

t_{vxi} – температура подаваемой на охлаждение воды, °C;

t_{vxi} – температура воды на выходе из ЛА, °C.

Определение тепловой нагрузки отдельного слоя витков производилось по показанию датчиков, фиксирующих температуру жидкости, поступающей и стекающей с j -го слоя витков в i -ый момент времени:

$$Q_{сл_i} = G_{в_{i,j}} \cdot (Cp_{вх.сл.i,j} \cdot t_{вх.сл.i,j} - Cp_{вых.сл.i,j} \cdot t_{вых.сл.i,j}) \text{ Вт}, \quad (2.3)$$

Где $Cp_{вх.сл.i,j}$ – удельная теплоёмкость воды поступающей на слой витков, Дж/(кг·°C);

$Cp_{вых.сл.i,j}$ – удельная теплоёмкость воды стекающей со слоя витков, Дж/(кг·°C);

$t_{вх.сл.i,j}$ – температура воды поступающей на слой витков, °C;

$t_{вых.сл.i,j}$ – температура воды, стекающей со слоя витков, °C.

Плотность теплового потока, отводимая ЛА в i -тый момент времени ЛА:

$$q_i = \frac{Q_i}{\pi d_{тр} L} \text{ Вт/м}^2, \quad (2.4)$$

где $d_{тр}$ – наружный диаметр трубки змеевика, м;

L – общая длина всех змеевиков, м.

Плотность теплового потока, отводимого в i -тый момент времени j -тым слоем витков ЛА:

$$q_{сл_{i,j}} = \frac{Q_{сл_{i,j}}}{\pi d_{тр} L_{сл}} \text{ Вт/м}^2, \quad (2.5)$$

где $L_{сл}$ – длина трубок одного слоя витков, м.

Определение осредненного по поверхности ЛА коэффициента теплоотдачи производилось на элементарном отрезке времени по следующему соотношению:

$$\alpha_{ср_i} = \frac{q_i}{(t_{ср_i} - t_{л})} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}, \quad (2.6)$$

где $t_{ср_i}$ – средняя температура воды в аппарате, °C;

$t_{л}$ – температура льда, 0 °C.

2.2 Анализ экспериментальных исследований

2.2.1 Обсуждение полученных результатов

На основе анализа экспериментальных данных были построены эпюры изменения температуры воды по мере её прохождения и охлаждения в ЛА для плёночного режима плавления в начальный и конечный моменты разрядки. Возможность построения подобных графиков обеспечивается благодаря датчикам температур, установленным после каждого слоя витков внутри аппарата. На рисунке 2.6 представлены результаты для режимов $t_{\text{вх}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 1\text{ кг/с}$ и $t_{\text{вх}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $G = 1\text{ кг/с}$. По оси абсцисс представлены номера слоёв витков аппарата, по оси ординат – температуры на входе в ЛА, после последовательного обтекания слоёв витков и на выходе из аппарата, соответственно.

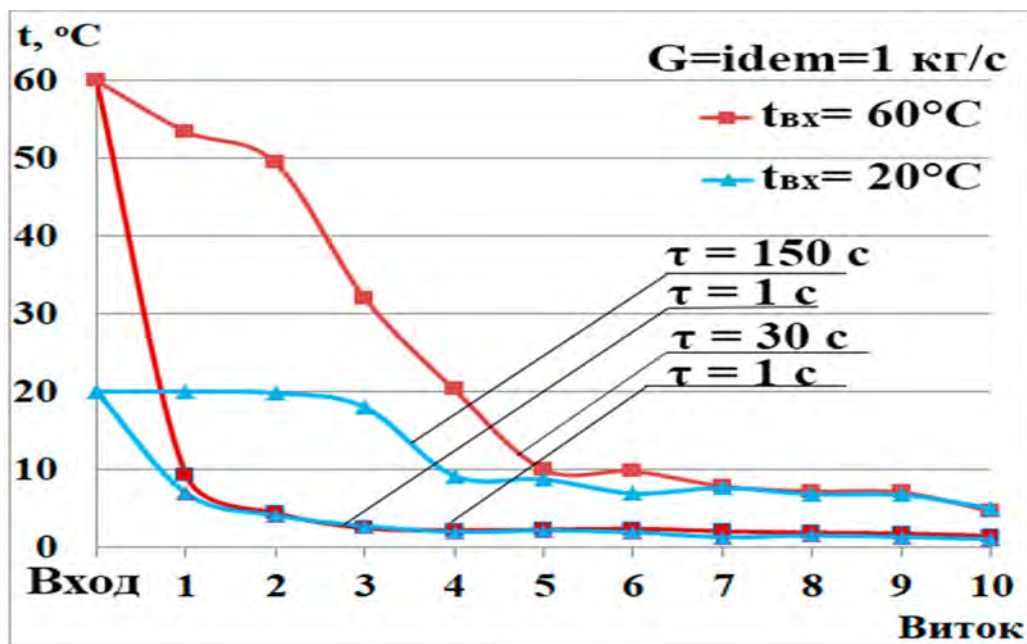


Рисунок 2.6 - Графики изменения температуры охлаждаемой в ЛА воды для плёночного режима плавления

Благодаря высокой интенсивности плавления льда в пленочном режиме обеспечивается практически полное охлаждение воды уже после обтекания первого слоя витков ЛА, как при $t_{\text{вх}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, так и при $t_{\text{вх}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Локальный тепловой баланс первого слоя витков позволил определить отводимую им

тепловую нагрузку, достигающую при температуре $t_{\text{вх}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ значения 210 кВт , что соответствует значению плотности теплового потока - 2100 кВт/м^2 отнесенного к поверхности первого слоя витков аппарата. Таким образом, в начальный момент времени максимальные значения теплосъёма для исследованных режимов обеспечиваются первым слоем витков.

Результаты измерения температуры охлаждаемой воды в плёночном режиме обтекания ледового массива и графики изменения тепловой нагрузки в течение разрядки для различных значений расхода и температуры подаваемой воды представлены на рисунках 2.7 – 2.13.

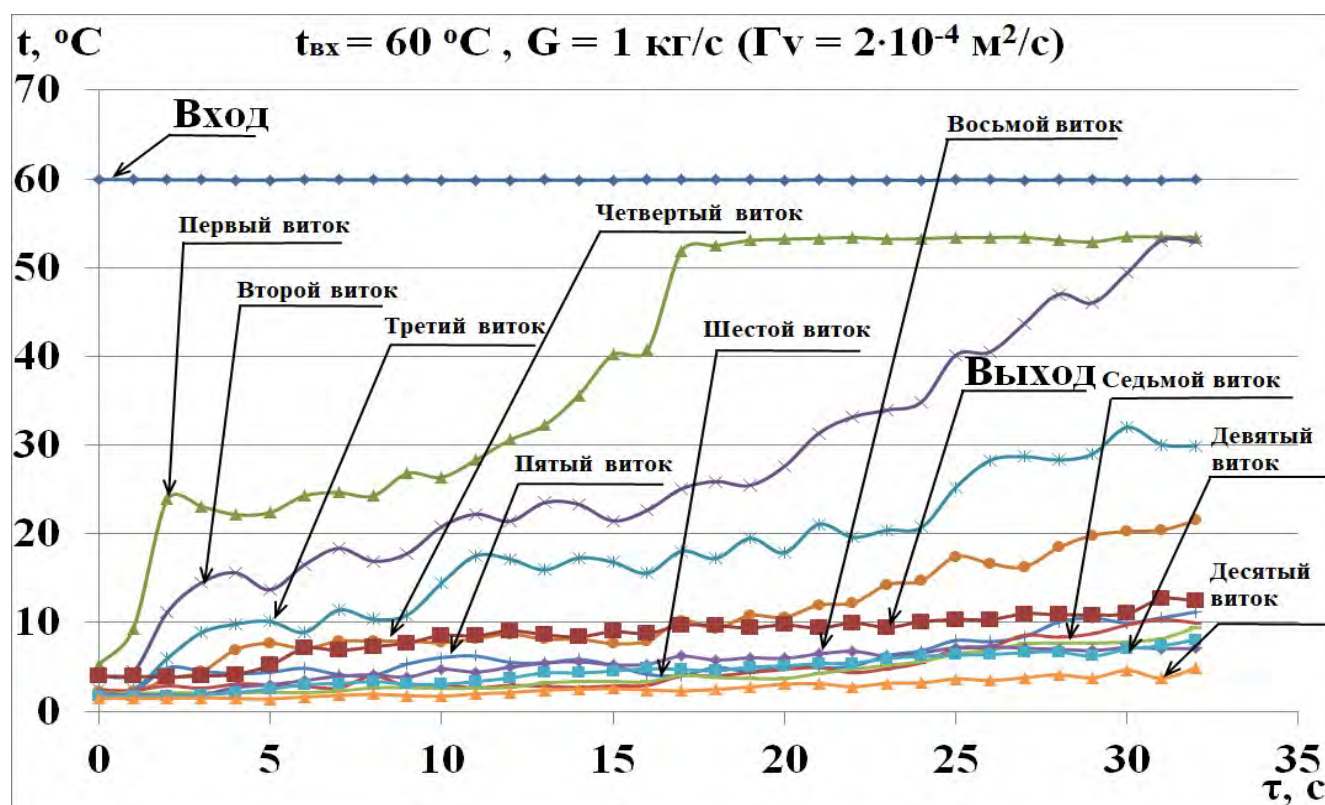


Рисунок 2.7 - График изменения температуры охлаждаемой воды при плёночном обтекании ЛА для $t_{\text{вх}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 1\text{ кг/с}$

На рисунке 2.7 можно видеть, что для наиболее интенсивного режима разрядки ЛА ($t_{\text{вх}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 1\text{ кг/с}$) обеспечивается охлаждение воды с температурного уровня 60 до температуры $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на начальном этапе эксперимента. Наибольший вклад в охлаждение подаваемой воды на начальном этапе вносит первый слой витков. По мере расплавления накопленного льда теплоотвод обеспечивается последующими витками. При этом, в связи с уменьшением площади поверхности

ледового массива по мере разрядки постепенно начинает снижаться отводимая тепловая нагрузка, что приводит к повышению температуры воды на выходе. Динамика изменения отводимой тепловой нагрузки для данного режима представлена на рисунке 2.8.

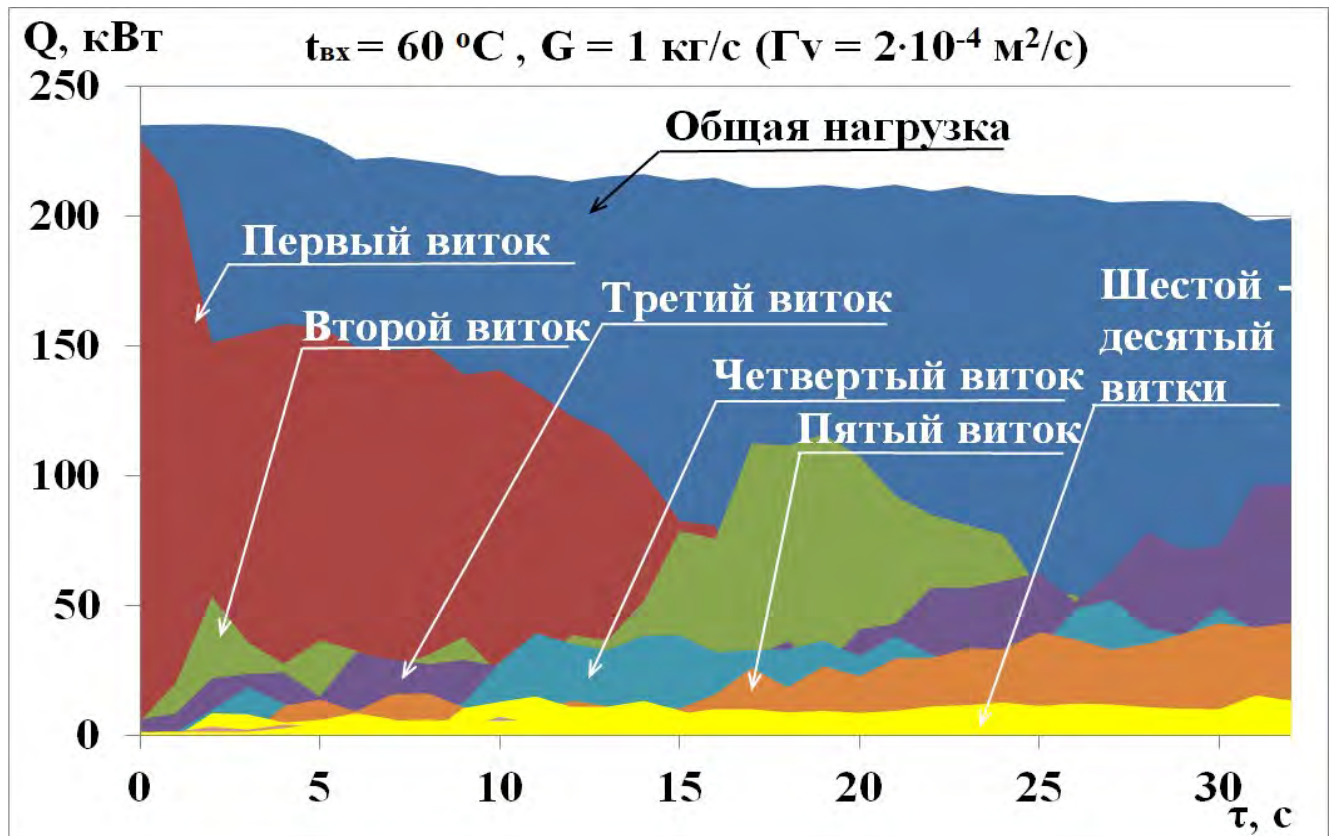


Рисунок 2.8 - График изменения тепловой нагрузки при пленочном обтекании ЛА для $t_{вх}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 1\text{ кг/с}$

Можно видеть, что на начальном этапе при площади поверхности аппарата 1 м^2 тепловая нагрузка отводимая ЛА достигает 230 кВт, что значительно превышает возможности современных льдоаккумуляторов. По мере расплавления ледового массива на первом слое витков основной теплосъём обеспечивается вторым и третьим слоями. Таким образом, можно сделать вывод о том, что в процессе разрядки существует активная зона плавления льда, т.е. часть слоёв витков, где процесс плавления происходит наиболее интенсивно. Как показали экспериментальные исследования, такая зона состоит из двух верхних слоёв витков, на которых момент времени τ_i присутствует лёд. По мере плавления льда происходит смещение активной зоны плавления к виткам, расположенным ниже,

и перераспределение тепловой нагрузки, при этом общий теплоотвод в ЛА практически не изменяется. Подобная тенденция прослеживается во всех исследованных режимах пленочного плавления. На рисунке 2.9 представлен наименее интенсивный режим разрядки ЛА ($t_{\text{вх}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 0,25\text{ кг/с}$).

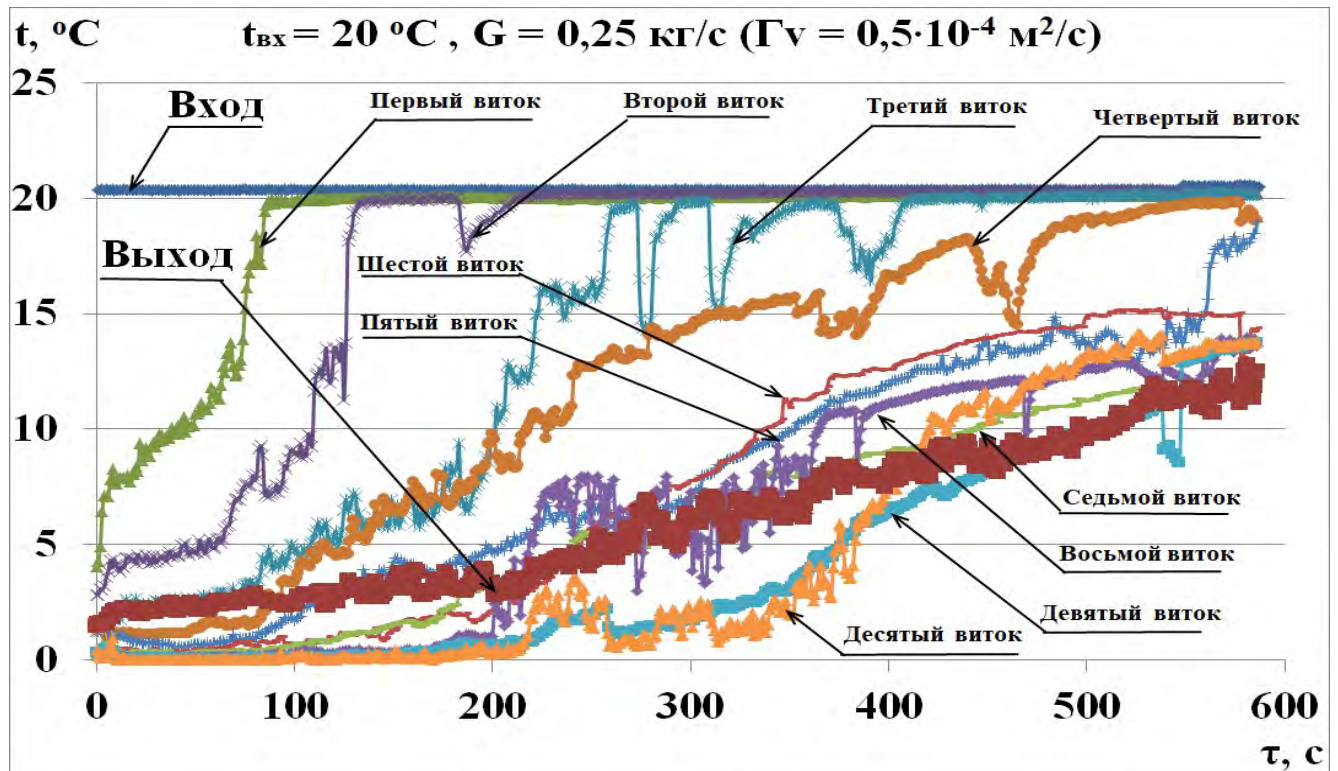


Рисунок 2.9 - График изменения температуры охлаждаемой воды при пленочном обтекании ЛА для $t_{\text{вх}}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 0,25\text{ кг/с}$

Можно видеть, что длительность процесса разрядки возросла практически в 20 раз, по сравнению с наиболее интенсивным режимом ($t_{\text{вх}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 1\text{ кг/с}$). При этом характер перераспределения отводимой тепловой нагрузки по мере разрядки идентичен, что подтверждается графиком тепловой нагрузки, представленном на рисунке 2.10.

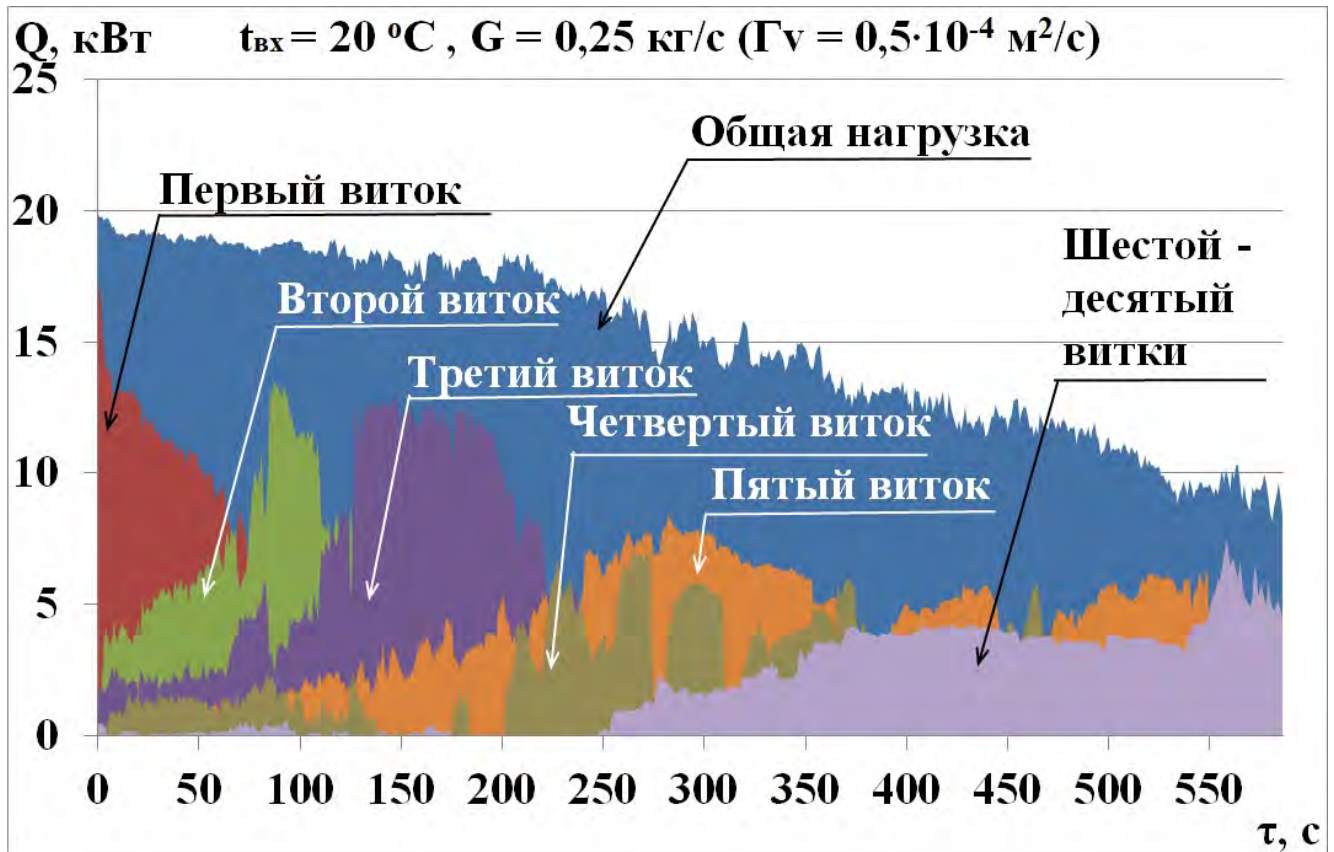


Рисунок 2.10 - График изменения тепловой нагрузки при пленочном обтекании ЛА для $t_{вх}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $G = 0,25\text{ кг/с}$

Для наименее интенсивного режима срабатывание слоёв витков также происходит аналогично. При расплавлении льда на верхнем слое постепенно увеличивается отводимая тепловая нагрузка на последующем слое. Для представленного режима до начала срабатывания слоёв витков с 6-го по 10-й, уровень отводимой тепловой нагрузки практически не изменяется. Падение отводимой тепловой нагрузки связано с уменьшением площади поверхности теплообмена и нарастанием эффекта свободного пролёта, когда часть охлаждаемой воды минует нижние слои витков.

Необходимо отметить, что длительность поддержания требуемой, по условиям экспериментов, температуры воды на выходе ограничивается исключительно массой льда, но не интенсивностью плавления. Подобный вывод можно сделать из анализа рисунков 2.11-2.13

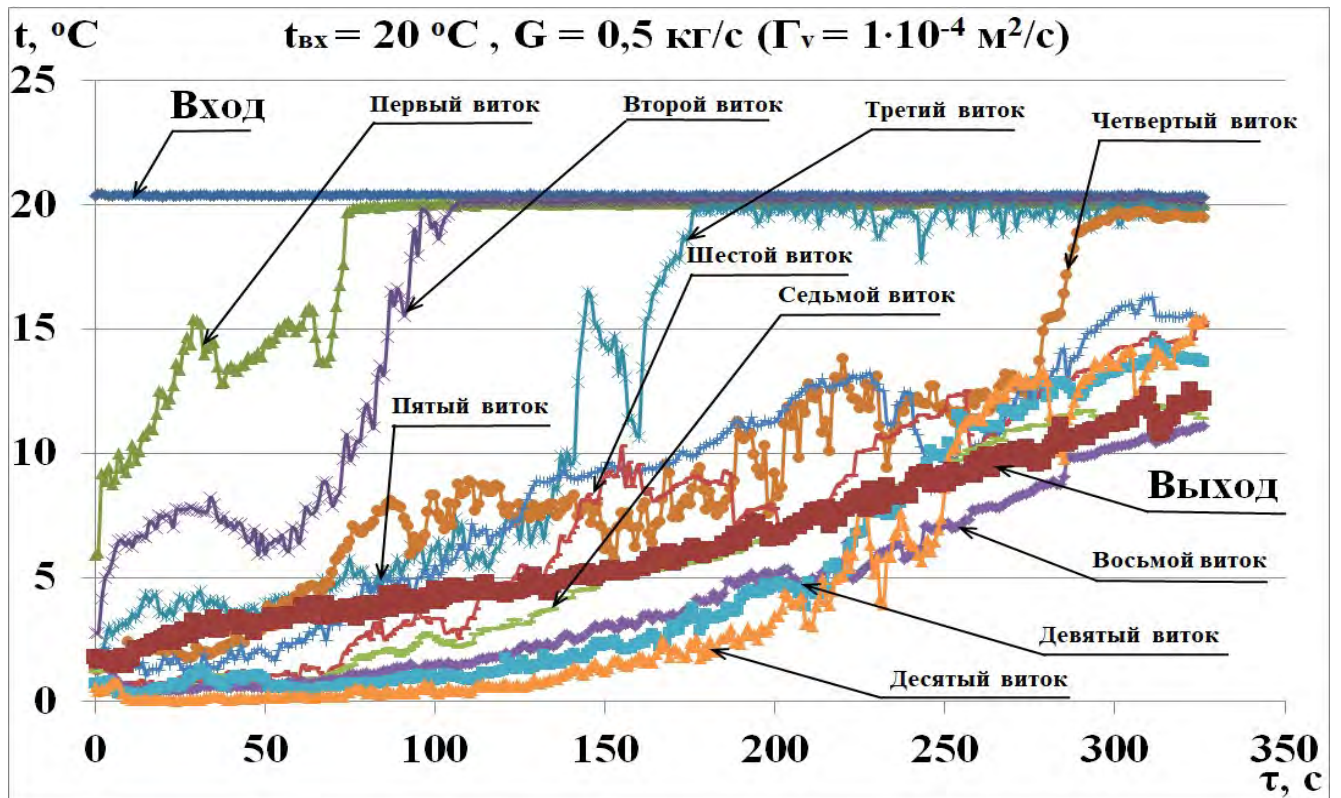


Рисунок 2.11 - График изменения температуры охлаждаемой воды при пленочном обтекании ЛА для $t_{\text{вх}}=20\text{ °C}$, $G = 0,5\text{ кг/с}$

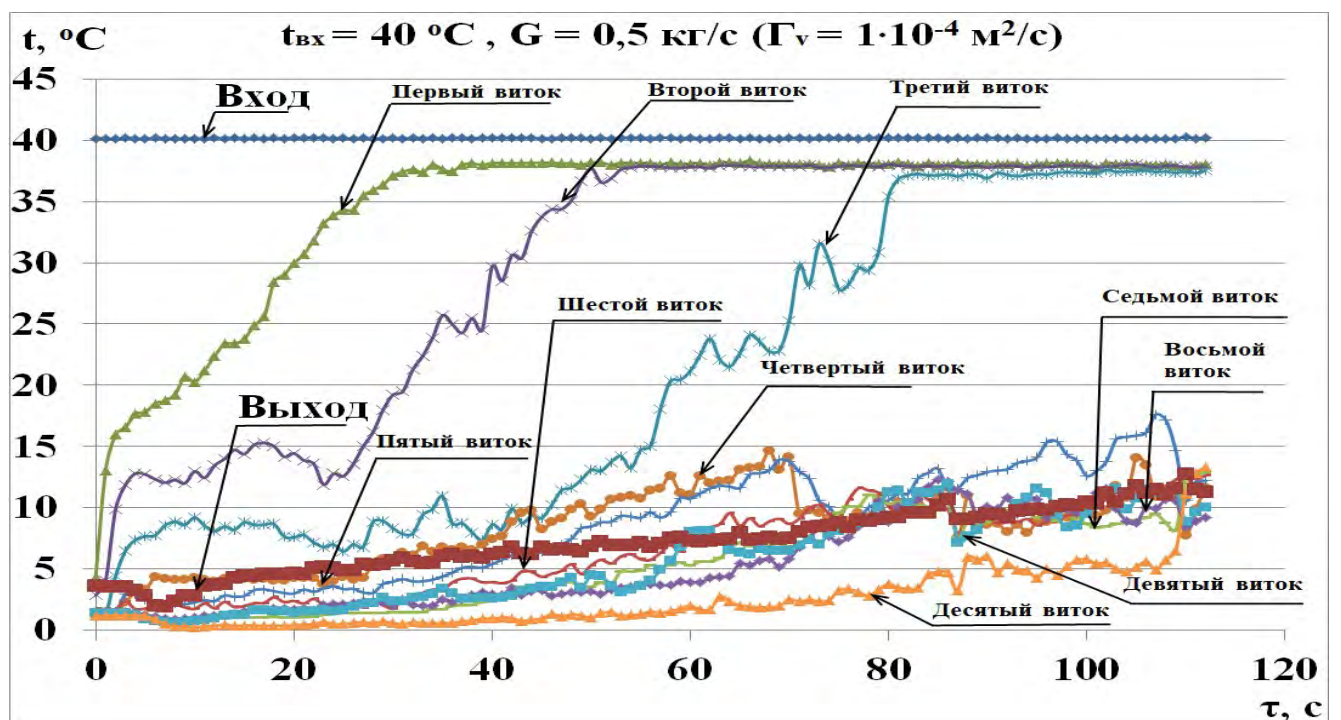


Рисунок 2.12 - График изменения температуры охлаждаемой воды при пленочном обтекании ЛА для $t_{\text{вх}}=40\text{ °C}$, $G = 0,5\text{ кг/с}$

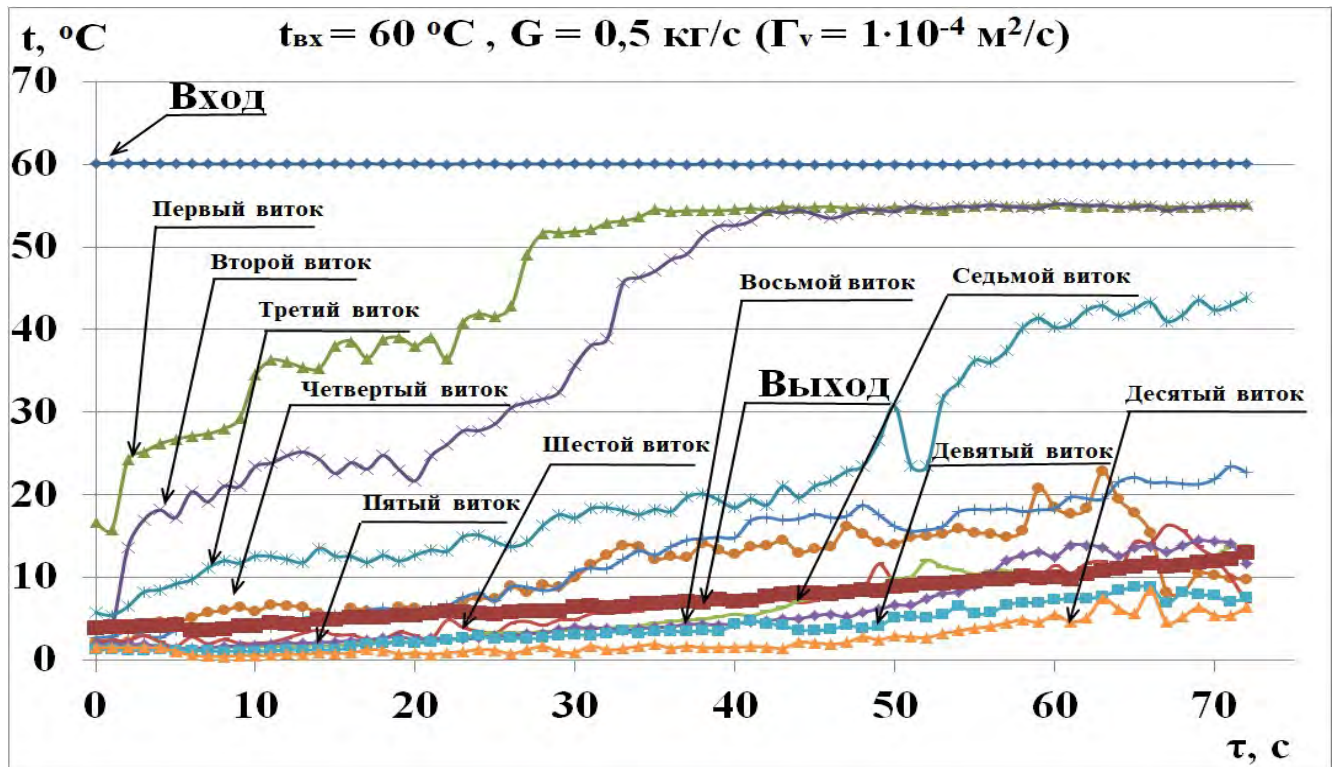


Рисунок 2.13 - График изменения температуры охлаждаемой воды при пленочном обтекании ЛА для $t_{\text{вх}}=60 ^\circ\text{C}$, $G = 0,5 \text{ кг/с}$

Можно видеть, что при фиксированном расходе ($G = 0,5 \text{ кг/с}$) и температурах подаваемой на охлаждение воды $20, 40$ и $60 ^\circ\text{C}$ длительность разрядки до $12 ^\circ\text{C}$ составила $331, 116$ и 72 секунды, соответственно. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что разработанный аппарат обладает возможностью саморегулирования и обеспечивает симметричный ответ на динамическое изменение тепловой нагрузки, что невозможно при объёмном режиме плавления. Кроме этого, при температурах подаваемой воды, превышающих температуру окружающей среды, часть тепловой нагрузки отводится непосредственно в процессе распыления за счет теплообмена с воздухом. Данный эффект возрастает с увеличением разности температур между охлаждаемой водой и воздухом. Так для режима с температурой подаваемой на охлаждение воды $40 ^\circ\text{C}$ распыление форсункой позволяет снизить начальную температуру воды, распыляемой на ледовую поверхность на $\sim 2,5 ^\circ\text{C}$, а для режима с $t_{\text{вх}}=60 ^\circ\text{C}$ уже на $\sim 5 ^\circ\text{C}$.

Для оценки плотности теплового потока, как для всего аппарата, так и для активной зоны плавления в исследованных режимах было проведено обобщение экспериментальных данных и построены графики, представленные на рисунке 2.14. На данных графиках по оси абсцисс представлены значения температуры подаваемой на охлаждение воды, по оси ординат представлены значения плотности теплового потока всего аппарата и активной зоны плавления для разных значений расходов подаваемой воды.

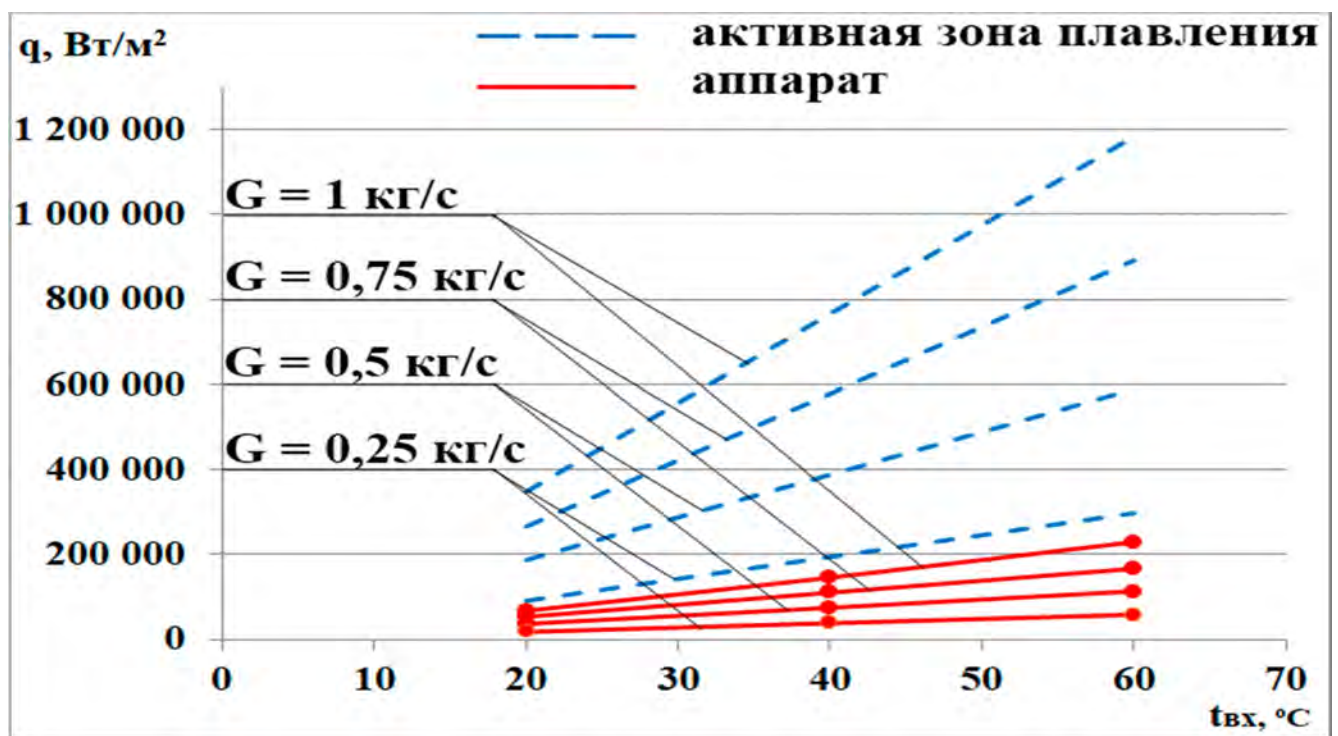


Рисунок 2.14 - Зависимость плотности теплового потока активной зоны плавления и всего аппарата в целом от температуры подаваемой на охлаждение воды.

Как видно из рисунка 2.14, плотность теплового потока для всего аппарата в режиме до 12°C при самом интенсивном из исследованных режимов, $t_{вх} = 60$ °C и $G = 1$ кг/с, достигает 230 кВт/м². Это подтверждает крайне высокую интенсивность теплообмена в пленочном льдоаккумуляторе в исследованном диапазоне значений плотностей орошения и температур. При этом для всех значений расходов охлаждаемой воды в пленочном ЛА наблюдается близкий к линейному рост отводимой тепловой нагрузки. При повышении расхода увеличение отводимой аппаратом тепловой нагрузки происходит значительно интенсивнее, однако предел, при котором теплосъем перестает возрастать, в

исследованном диапазоне не достигается. Это подтверждается экспериментальными значениями плотностей теплового потока для активной зоны плавления, которые в 5 – 7 раз превосходят аналогичные для всего ЛА в зависимости от режима. При этом максимально высокий показатель плотности теплового потока в активной зоне плавления составил 1175 кВт/м^2 в режиме $t_{\text{вх}}=60 \text{ }^\circ\text{C}$, $G=1 \text{ кг/с}$. Таким образом, предложенный плёночный механизм теплоотвода может быть эффективно использован и при более высоких температурах подаваемой воды.

Одним из важнейших параметров аппарата является коэффициент теплоотдачи. Для льдоаккумуляторов определение коэффициента теплоотдачи представляет собой сложно математически формализуемую задачу в силу следующих причин:

- площадь поверхности теплообмена непрерывно нелинейно изменяется в процессе плавления льда;
- расход воды увеличивается по мере обтекания ледовой поверхности вследствие фазового перехода на границе раздела.

В связи с этим значения коэффициента теплоотдачи для всего аппарата было решено осреднять по площади поверхности испарителя.

На рисунке 2.15 представлена зависимость осредненного коэффициента теплоотдачи от плотности орошения и расхода в процессе плавления льда. По осям абсцисс представлены значения расходов и плотностей орошения подаваемой на охлаждение воды, по оси ординат представлены значения осредненного коэффициента теплоотдачи при различных температурах между подаваемой на охлаждение воды и льдом.

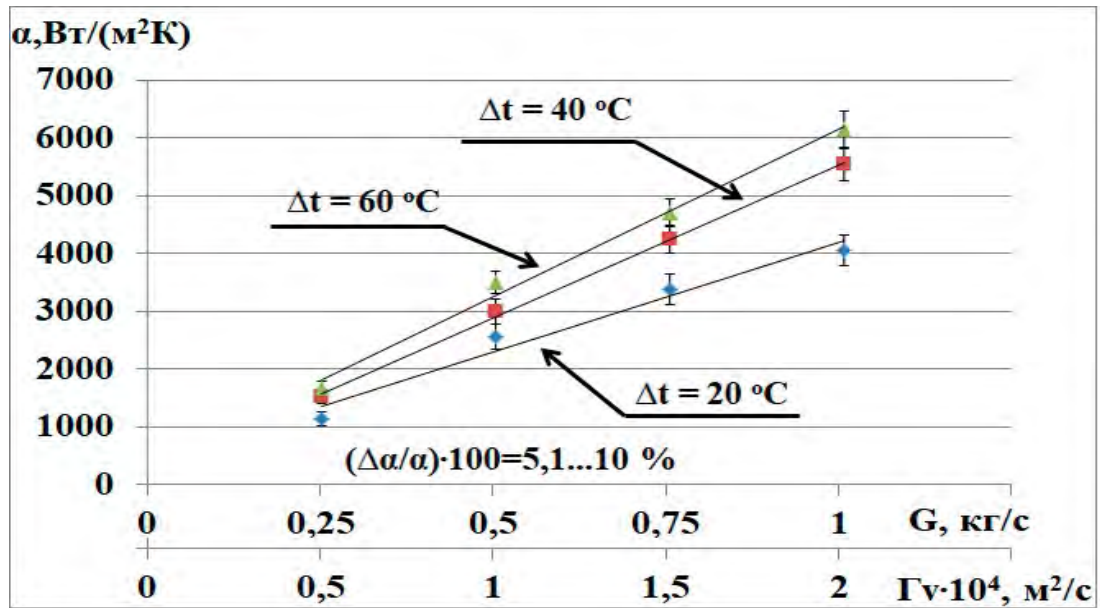


Рисунок 2.15 - Зависимость осредненного коэффициента теплоотдачи от массового расхода и плотности орошения

Представленные на данном графике значения α существенно ниже наблюдаемых в активной зоне плавления, так как при расчёте учитывается вся площадь аппарата. В связи с этим значение коэффициента теплоотдачи, осредненного по площади поверхности ЛА также значительно ниже реальных значений, однако и при таком осреднении достигает значений свыше 6000 Вт/(м²·К)

В качестве критерия оценки эффективности процессов плавления льда, в различных режимах, выбрана продолжительность поддержания температуры воды на выходе из аппарата в требуемом технологией диапазоне температур при идентичной массе намороженного льда. На рисунке 2.16 приведены сравнительные графики зависимости температуры воды на выходе из аппарата от времени для ЛА с пленочным плавлением и плавлением в объёме жидкости для режима $t_{\text{вх}} = 40^\circ\text{C}$ и $G = 0,5$ кг/с. Для режима с пленочным плавлением также был учтен запас ледяной воды, оставшейся после зарядки ЛА. По оси абсцисс представлена длительность разрядки ЛА, по оси ординат представлена температура воды, подаваемой потребителю.

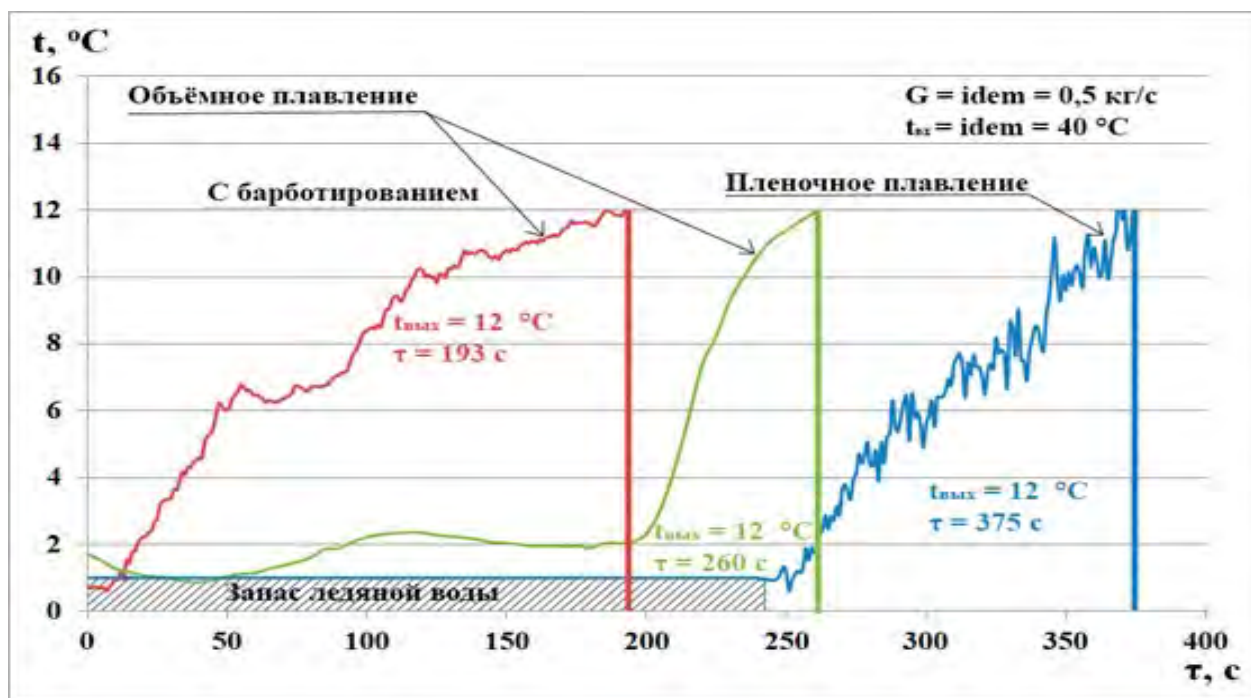


Рисунок 2.16 - Зависимость температуры воды на выходе из ЛА башенного типа от времени для трех способов разрядки

Можно видеть, что продолжительность поддержания температуры воды на выходе ниже $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ при плёночном плавлении практически в 1,5 раза превышает аналогичный показатель для объёмного плавления. При этом дополнительная турбулизация воды в межтрубном пространстве (барботирование) снижает длительность поддержания требуемого режима практически в 2 раза. Комплекс проведённых экспериментов в широком диапазоне температур позволил сделать вывод о целесообразности дополнительной турбулизации только при малых расходах и разности температур между льдом и охлаждаемой водой. С увеличением температуры подаваемой воды турбулизация нарушает естественную стратификацию столба воды в объёме башенного льдоаккумулятора.

2.2.2. Оценка неопределенности определения коэффициента теплоотдачи

Согласно современной терминологии и практике применения, неопределённость измерения - это неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние

значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании используемой информации [102]. Стандартная неопределенность – это неопределенность результата измерения, выраженная в виде стандартного отклонения.

В настоящее время введено и используется деление неопределенности по типу А и по типу В:

- Оценивание по типу А - это оценка отклонений за счет их статистической обработки, что позволяет учесть несистематическую (случайную) неопределенность.
- Оценивание по типу В - это оценка отклонений, имеющих систематическую (приборную) неопределенность.

Согласно ГОСТ 34100.3-2017 [103]: “Суммарная стандартная неопределенность (англ. combined standard uncertainty): стандартная неопределенность результата измерения, полученного из значений ряда других величин, равная положительному квадратному корню взвешенной суммы дисперсий или ковариаций этих величин, весовые коэффициенты при которых определяются зависимостью изменения результата измерения от изменений этих величин.”

Суммарная стандартная неопределенность рассчитывается по формуле:

$$u_y = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2}, \quad (2.7)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i$ – дисперсия величины x_i , которая может быть определена в ходе экспериментов или получена из справочников, технического описания и.т.д.

Пример расчета относительной неопределённости полученных значений коэффициента теплоотдачи, приведенного к полной поверхности ЛА для экспериментальной точки в пленочном режиме плавления при $G=0,5$ кг/с, $t_{\text{вх}}=40$ °С, $t_{\text{вых}}=4$ °С.

Для этого необходимо оценить неопределенность:

- расхода воды;
- температуры;
- тепловой нагрузки;

- плотности теплового потока;
- коэффициента теплоотдачи.

Неопределенность при измерении расхода воды:

Для источников неопределенности случайного характера вычисляем неопределенность по типу А:

Среднее значение расхода жидкости исходя из проведенных замеров:

$$G_{\text{ср}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_i = \frac{0,57+0,53+0,52+0,48+0,5+0,49}{6} = 0,515 \text{ кг/с} \quad (2.8)$$

Неопределенность измерений по типу А для расхода:

$$u_A(G) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (G_i - G)^2}{n(n-1)}} =$$

$$= \sqrt{\frac{(0,57-0,515)^2 + (0,53-0,515)^2 + (0,52-0,515)^2 + (0,48-0,515)^2 + (0,5-0,515)^2 + (0,49-0,515)^2}{6 \cdot (6-1)}} = 0,015 \text{ кг/с} \quad (2.9)$$

Неопределенность по типу В при измерении расхода:

$$G = \frac{m}{\tau} \text{ кг/с} \quad (2.10)$$

$$u_B(G) = \sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial m} u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial \tau} u_\tau\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{\tau^2} u_\tau\right)^2} \quad (2.11)$$

Для электронных весов М-ER 326AFU 32.1 с высоким классом точности (II) согласно ГОСТ OIML R 76-1-2011 [104] пределы допускаемой погрешности в эксплуатации равны удвоенному значению пределов допускаемых погрешностей при первичной поверке:

$$\Delta m = \pm 2e \text{ кг}, \quad (2.12)$$

где e – поверочный интервал для весов М-ER 326AFU 32.1 = 0,005 кг.

В спецификации изготовителя, свидетельстве о поверке, справочнике или другом источнике дается интервал отклонения входной величины от ее оценки. Эту информацию необходимо перевести в формат определения неопределённостей с помощью функции распределения вероятностей. Если в документации указаны предельные границы входной величины или максимальное значение диапазона ($\pm \alpha$) без указания уровня доверия, то можно воспользоваться формулой расчета стандартной неопределенности с прямоугольной функцией распределения вероятностей:

$$u_B(X_i) = \frac{\alpha}{\sqrt{3}} \quad (2.13)$$

Тогда для рассматриваемого случая:

$$u_B(m) = \frac{2e}{\sqrt{3}} = \frac{2 \cdot 0,005}{\sqrt{3}} = 5,77 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \quad (2.14)$$

Для секундомера Hanhart неопределенность по типу В составляет:

$$u_B(\tau) = \frac{20 \cdot 1 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{3}} = 1,16 \cdot 10^{-4} \text{ с} \quad (2.15)$$

Тогда неопределенность по типу В при измерении расхода:

$$\begin{aligned} u_B(G) &= \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} u_m\right)^2 + \left(-\frac{m}{\tau^2} u_\tau\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{20} \cdot 5,77 \cdot 10^{-3}\right)^2 + \left(-\frac{10}{20^2} \cdot 1,16 \cdot 10^{-4}\right)^2} = 0,017 \text{ кг/с} \end{aligned} \quad (2.16)$$

Суммарная стандартная неопределенность расхода:

$$u_c(G) = \sqrt{u_A^2(G) + u_B^2(G)} = \sqrt{0,015^2 + 0,017^2} = 0,023 \text{ кг/с} \quad (2.17)$$

Для ЧЭПТ 19-2 класса точности В отклонения для рассматриваемого режима составляют:

$$\Delta_{\text{чэпт}} = \pm 0,6^\circ\text{C} \quad (2.18)$$

$$u_B(\Delta_{\text{чэпт}}) = \frac{\Delta_{\text{чэпт}}}{\sqrt{3}} = 0,346^\circ\text{C} \quad (2.19)$$

Отклонение измерений с помощью прибора РМТ 59L для конфигураций с входными электрическими сигналами от термопреобразователей сопротивления для датчиков pt100 составляют:

$$\Delta_{\text{pmt}} = \pm 0,8^\circ\text{C} \quad (2.20)$$

$$u_B(\Delta_{\text{pmt}}) = \frac{\Delta_{\text{pmt}}}{\sqrt{3}} = 0,462^\circ\text{C} \quad (2.21)$$

Неопределенность измерения температуры:

$$u_c(t) = \sqrt{u_B^2(\Delta_{\text{чэпт}}) + u_B^2(\Delta_{\text{pmt}})} \quad (2.22)$$

$$u_c(t) = \sqrt{0,346^2 + 0,462^2} = 0,58^\circ\text{C} \quad (2.23)$$

Суммарная стандартная неопределенность площади ЛА:

$$F = \pi dl = 3,14 \cdot 0,0127 \cdot 26 = 1,03 \text{ м}^2, \quad (2.24)$$

где d – внешний диаметр трубки, м;

l – длина трубки, м.

$$\begin{aligned} u_F &= \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial d} u_d\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial l} u_l\right)^2} = \sqrt{(\pi l u_d)^2 + (\pi d u_l)^2} = \\ &= \sqrt{(\pi \cdot 26 \cdot 10^{-4})^2 + (\pi \cdot 0,0127 \cdot 10^{-4})^2} = 8,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Суммарная стандартная неопределенность определения тепловой нагрузки:

$$Q_i = G_i \cdot (Cp_{\text{BX}} \cdot t_{\text{BX}} - Cp_{\text{ВЫХ}} \cdot t_{\text{ВЫХ}}) = 0,5 \cdot (4187 \cdot 40 - 4208 \cdot 4) = 75324 \text{ Вт} \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} u_Q &= \sqrt{\left(\frac{\partial Q}{\partial G} u_G\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t_{\text{BX}}} u_{t_{\text{BX}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q}{\partial t_{\text{ВЫХ}}} u_{t_{\text{ВЫХ}}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{((Cp_{\text{BX}} \cdot t_{\text{BX}} - Cp_{\text{ВЫХ}} \cdot t_{\text{ВЫХ}}) u_G)^2 + (G Cp_{\text{BX}} u_t)^2 + (-G Cp_{\text{ВЫХ}} u_t)^2} = \\ &= \sqrt{((4187 \cdot 40 - 4208 \cdot 4) \cdot 0,023)^2 + (0,5 \cdot 4187 \cdot 0,58)^2 + (-0,5 \cdot 4208 \cdot 0,58)^2} = \\ &= 3862,46 \text{ Вт} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Суммарная стандартная неопределенность расчета плотности теплового потока:

$$q_i = \frac{Q_i}{F} = \frac{75324}{1,03} = 73130,1 \text{ Вт/м}^2 \quad (2.28)$$

$$\begin{aligned} u_q &= \sqrt{\left(\frac{\partial q}{\partial Q} u_Q\right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial F} u_F\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{F} u_Q\right)^2 + \left(-\frac{Q}{F^2} u_F\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{1,03} \cdot 3862,46\right)^2 + \left(-\frac{73130,1}{1,03^2} \cdot 8,17 \cdot 10^{-3}\right)^2} = 3794,5 \text{ Вт/м}^2 \end{aligned} \quad (2.29)$$

Суммарная стандартная неопределенность расчета коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_i = \frac{q_i}{(t_{\text{ср}i} - t_{\text{л}})} = \frac{73130,1}{\frac{40+4}{2}} = 3324,1 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \quad (2.30)$$

$$\begin{aligned} u_a &= \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial q} u_q\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial t_{\text{BX}}} u_{t_{\text{BX}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial t_{\text{ВЫХ}}} u_{t_{\text{ВЫХ}}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{\left(\frac{t_{\text{BX}} + t_{\text{ВЫХ}}}{2}\right)} u_q\right)^2 + \left(-\frac{2q}{(t_{\text{BX}} + t_{\text{ВЫХ}})^2} u_{t_{\text{BX}}}\right)^2 + \left(-\frac{2q}{(t_{\text{ВЫХ}} + t_{\text{ВЫХ}})^2} u_{t_{\text{ВЫХ}}}\right)^2} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{1}{\left(\frac{40+4}{2}\right)} \cdot 3794,5\right)^2 + \left(-\frac{2 \cdot 73130,1}{(40+4)^2} \cdot 0,58\right)^2 + \left(-\frac{2 \cdot 73130,1}{(40+4)^2} \cdot 0,58\right)^2} = 183,27 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)} \end{aligned} \quad (2.31)$$

Относительная неопределенность рассчитанного коэффициента теплоотдачи составляет:

$$\frac{u_a}{\alpha_i} \cdot 100 = \frac{183,27}{3324,1} \cdot 100 = 5,51\% \quad (2.32)$$

Относительная неопределенность для всех исследованных режимов составила от 5,11 до 10,03% (рисунок 2.17).

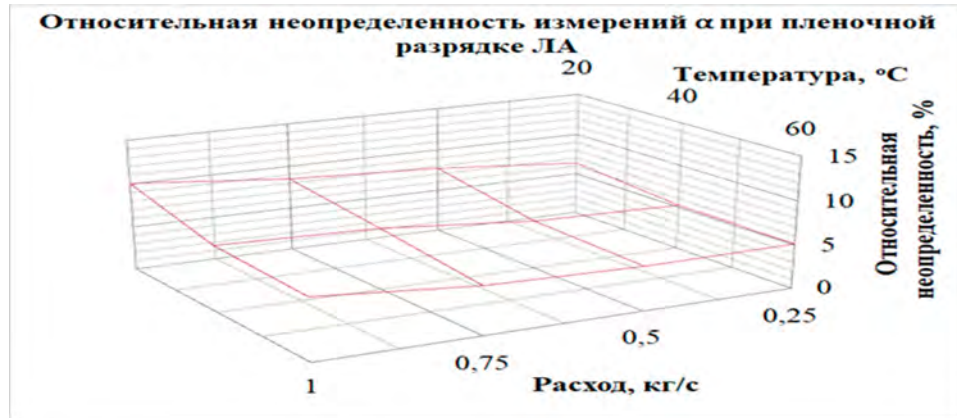


Рисунок 2.17 - Относительная неопределенность измерений коэффициента теплоотдачи для всех исследованных режимов пленочной разрядки ЛА

Данные значения относительной неопределённости позволяют говорить о достоверности полученных экспериментальных данных и объективности полученных результатов.

2.2.3 Создание эмпирической зависимости

Процесс тепломассообмена при пленочном обтекании плавящихся ледовых поверхностей представляет собой многофакторную задачу с высокой степенью нестационарности. В частности, интенсивное стохастическое изменение площади и формы обтекаемой поверхности в активной зоне плавления (рисунок 2.18).

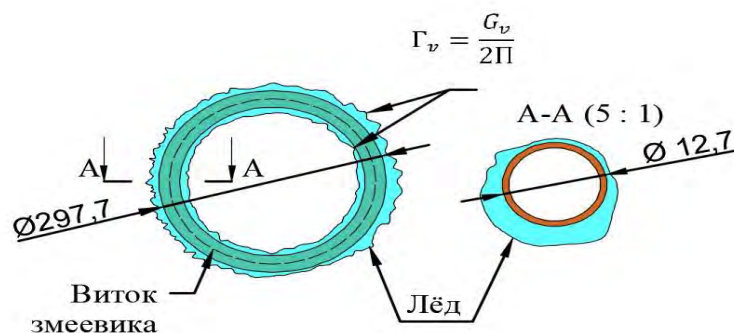


Рисунок 2.18 - Схематичное изображение плавления льда на трубке витка одного змеевика

Математически формализовать описание процесса и получить аналитическое решение возможно только при введении большого числа допущений. Этим может объясняться отсутствие в открытых источниках аналитических решений для пленочного обтекания ледовых поверхностей с фазовым переходом - плавлением. Рациональным решением является обобщение результатов экспериментальных исследований в виде эмпирических зависимостей, включающих все определяющие процесс параметры. Такое представление позволяет оценить степень влияния каждого фактора на интенсивность теплообмена и на продолжительность разрядки плёночного льдоаккумулятора. В отличие от аналитических решений и численного моделирования, дополнительным преимуществом таких зависимостей является возможность использования их потенциальным потребителем для оценки эффективности применения ЛА данного типа на конкретном предприятии или производстве.

С точки зрения физики протекающих в пленочном ЛА процессов наиболее целесообразно рассчитывать тепловую нагрузку, отводимую ЛА в конкретный момент времени разрядки по разностному принципу:

$$Q = f1 - f2 \quad (2.33)$$

$$Q = 6.19 \cdot \Gamma^{0.921} \cdot t_{\text{вх}i}^{1.36} - 0.51 \cdot 10^{-3} \cdot \Gamma^{2.1} \cdot t_{\text{вх}i}^{2.52} \cdot \tau_i^{1.41} \text{ Вт}, \quad (2.34)$$

где Γ – плотность орошения, кг/(м·с);

τ_i – длительность процесса разрядки, с;

$t_{\text{вх}i}$ – температура подаваемой на охлаждение воды, °С.

В представленной эмпирической зависимости первый её член (уменьшаемое), представленный в виде функции $f1$, позволяет определять максимальное значение тепловой нагрузки, отводимой в начальный момент времени. Второй член со знаком минус $f2$ (вычитаемое) отражает снижение величины отводимой тепловой нагрузки по мере плавления льда. При этом влияние каждого из

основных факторов (Γ , τ_i и $t_{\text{вх}i}$) определяется соответствующим показателем степенной функции.

Представленная эмпирическая зависимость также учитывает влияние массы расплавляемого льда на значение температуры выхода продукционного потока воды. Масса расплавленного льда находится по следующему соотношению:

$$m_{\text{pi}} = m_{\text{вх}i} \cdot \left(1 + \frac{(t_{\text{вх}i} - t_{\text{вых}i})}{\frac{r}{c_{\text{pв}}} + t_{\text{вых}i}} \right) - m_{\text{вх}i} \text{ кг}, \quad (2.35)$$

где $m_{\text{вх}i}$ – масса воды, поступающей на охлаждение в момент времени τ_i , кг;

r – скрытая теплота плавления льда, 335 кДж/кг.

На основе представленной зависимости и экспериментальных данных построены графики отводимой тепловой нагрузки для всех исследованных режимов пленочного плавления (рисунки 2.19 – 2.21). По оси абсцисс представлена длительность разрядки ЛА, по оси ординат отводимая тепловая нагрузка. Красными линиями выделены данные, полученные при помощи эмпирической зависимости, а черными - экспериментальные данные.

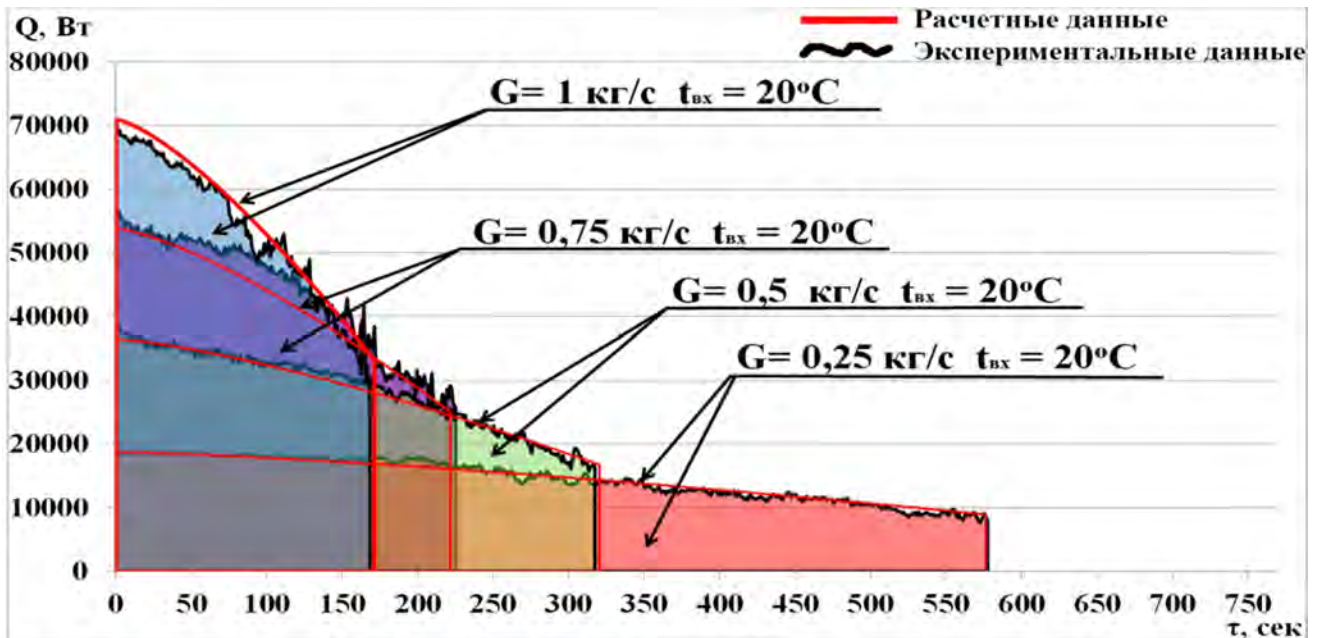


Рисунок 2.19 - Сравнение экспериментальных данных и значений тепловой нагрузки, рассчитанных по разностной эмпирической зависимости для $t_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$.

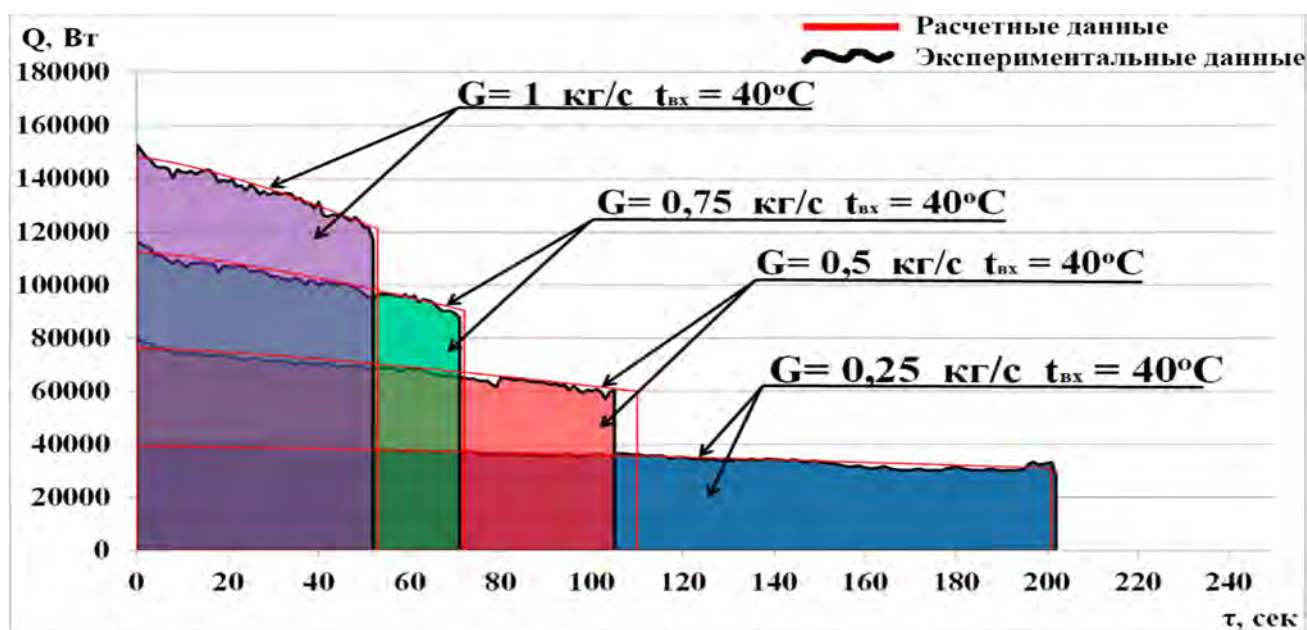


Рисунок 2.20 - Сравнение экспериментальных данных и значений тепловой нагрузки, рассчитанных по разностной эмпирической зависимости для $t_{bx}=40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

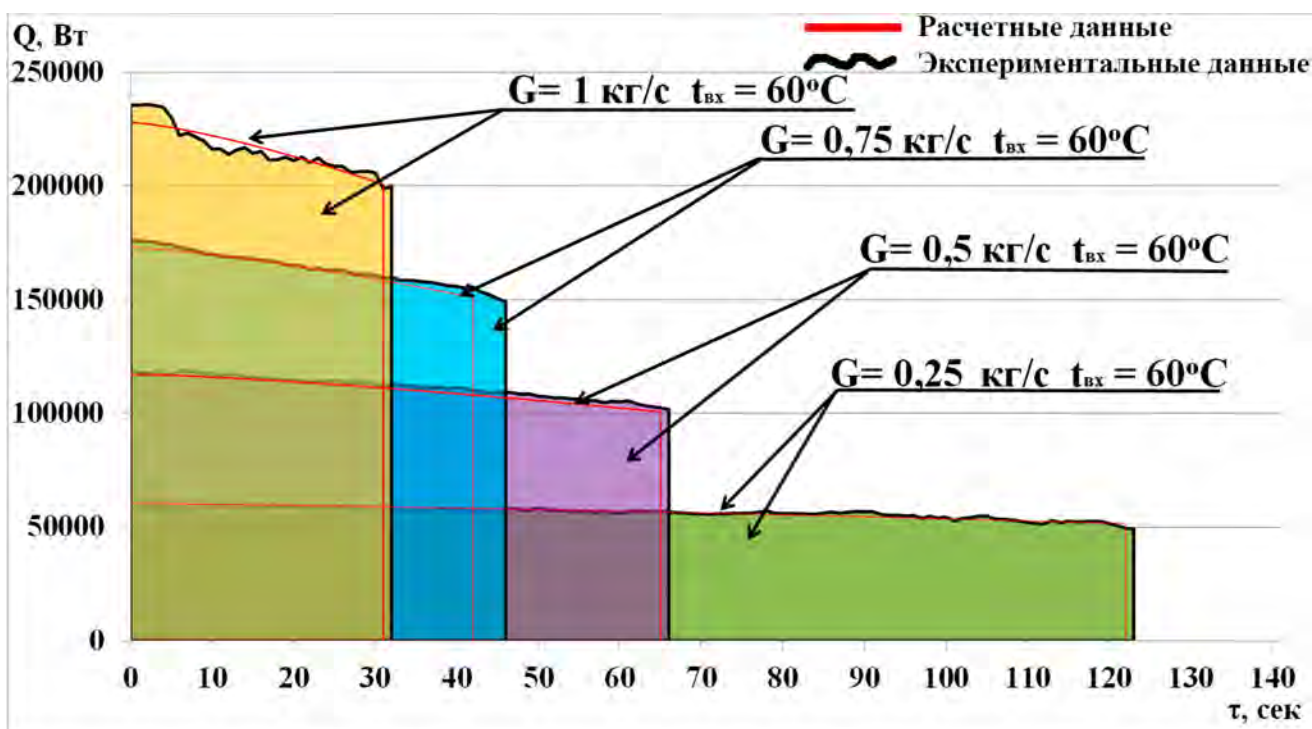


Рисунок 2.21 - Сравнение экспериментальных данных и значений тепловой нагрузки, рассчитанных по разностной эмпирической зависимости для $t_{bx}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Можно видеть, что предложенная эмпирическая зависимость хорошо описывает процесс пленочного плавления льда в ЛА.

На основе полученной эмпирической зависимости, обратным счетом определяются значения температуры выхода для i -го момента времени:

$$t_{\text{вых}i} = t_{\text{вх}i} - \frac{q_i}{G_B \cdot c_{p_B}} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.36)$$

Сравнение экспериментальных и рассчитанных при помощи эмпирической зависимости данных приведено на рисунке 2.22. По оси абсцисс представлены значения длительности разрядки ЛА, по оси ординат - значения температуры охлажденной воды на выходе из аппарата. Маркерами показаны экспериментальные данные, сплошными линиями – данные, полученные при помощи предложенной зависимости.

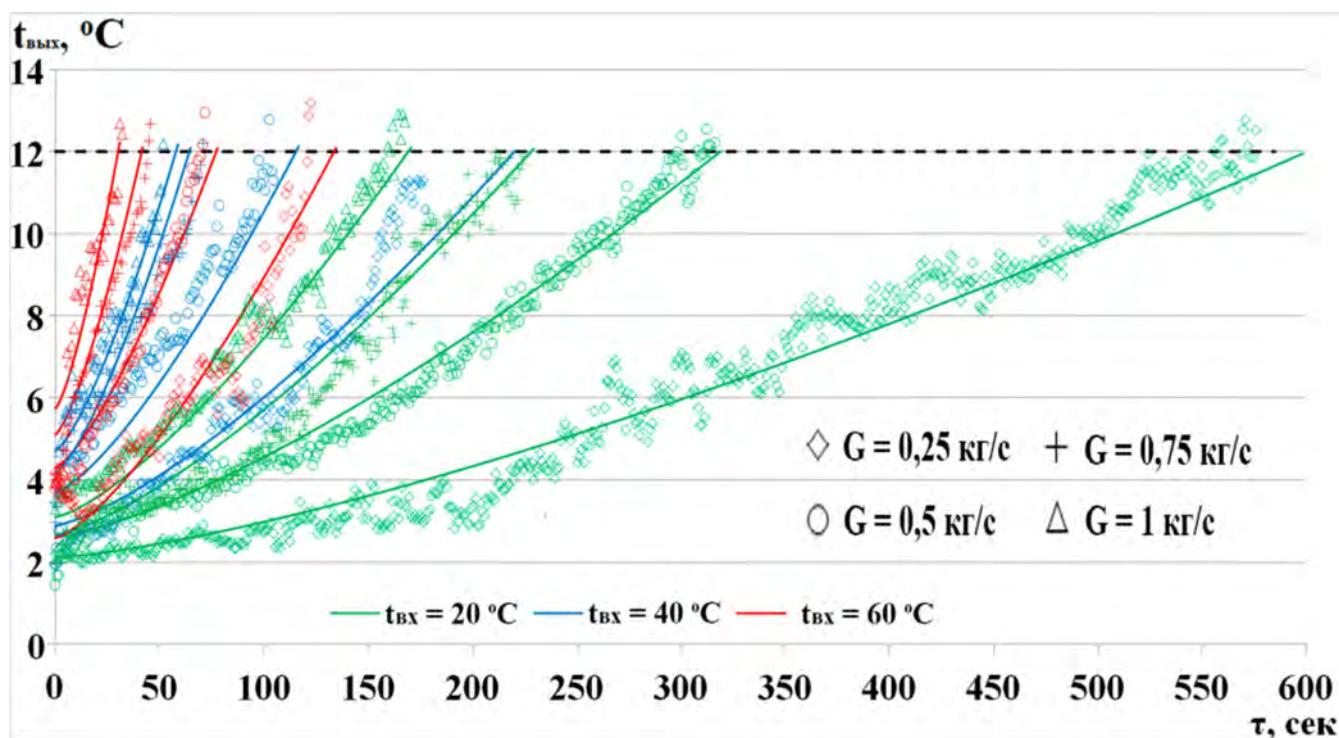


Рисунок 2.22 - Зависимость температуры выхода воды от времени разрядки аппарата по экспериментальным данным и эмпирической зависимости для всех режимов пленочного плавления.

Представленная эмпирическая зависимость позволяет определять тепловую нагрузку, и опосредованно, температуру выхода из пленочного льдоаккумулятора до температурного уровня 12°C в исследованном диапазоне расходов и температур подаваемой на охлаждение воды для разработанного пленочного ЛА.

Как видно из представленных графиков, разработанная эмпирическая зависимость хорошо коррелирует с результатами экспериментальных исследований.

Степень приближения представленной эмпирической зависимости к базе экспериментальных данных оценивалась с помощью средней ошибки аппроксимации, определяющей среднее отклонение полученных значений от фактических.

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \cdot 100\% = 5,12\% \quad (2.37)$$

Средняя ошибка аппроксимации составила 5,12%, что говорит о высокой точности созданной зависимости [105].

Коэффициент детерминации R^2 определялся следующим образом:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y})^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} = 0,99, \quad (2.38)$$

где $(y_i - \hat{y})^2$ - сумма квадратов остатков (ошибок) регрессии;

$(y_i - \bar{y})^2$ - сумма квадратов отклонений точек данных от среднего значения.

Для представленной регрессии значение коэффициента детерминации составило 0,99, что говорит о том, что 99% случаев изменения аргумента описываются функцией.

2.2.4 Обработка результатов методами теории подобия

Согласно теории подобия физических процессов, можно обеспечить моделирование тех или иных явлений в форме, удобной для исследователя. Метод подобия основывается на том, что решение физической задачи не должно зависеть от случайного выбора системы мер. Выбор той или иной системы мер может отражаться только на величине численных коэффициентов уравнений, но не на их структуре, т.е. вид уравнения всегда один и тот же.

Для подобия необходимы **три** условия:

1. Явления должны происходить в геометрически подобных системах.

2. Нестационарные явления должны быть гомохронными, т.е. для каждого момента времени одного явления должен соответствовать момент времени другого явления.

3. Отношения одинаковых величин, существенных для процесса, в сходных точках и в сходственные моменты времени должны быть равны между собой.

При выполнении трех представленных выше условий, возможно использовать критериальные уравнения.

Критериальные уравнения можно получить двумя путями: из дифференциальных уравнений или при помощи анализа размерности [106]. В настоящей работе представлено получение критериального уравнения при помощи анализа размерности.

Для определения размерных параметров исследуемого явления необходимо максимально достоверно и информативно описать рассматриваемый процесс с физической точки зрения. Исследуемый процесс - обтекание ледовых поверхностей, замороженных на трубке. Вода с определенной температурой и фиксированным расходом подается через распределитель жидкости (форсунку) и образует пленочное течение на плавящейся ледовой поверхности. В процессе обтекания ледового массива в результате плавления льда к пленке жидкости в момент времени τ_i добавляется фракция расплава $\frac{\partial m}{\partial \tau}$. В результате этого, с одной стороны, изменяется площадь поверхности, форма и толщина ледового массива, а с другой, толщина пленки, обтекающей ледовую поверхность. Учитывая высокую степень нестационарности, рассматриваемое явление можно представить в виде квазистационарного процесса, с осреднением значений внутри i -го интервала. Процесс теплопередачи при плавлении определяется условиями теплообмена между жидкой и твердой фазами, а также на границах замкнутой системы, что приводит к постепенному возрастанию толщины пленки.

Для вывода критериального уравнения вводятся следующие допущения:

1. Не учитывается искажение цилиндрической поверхности из-за образования различных каверн, криволинейных пазух и протоков сложной конфигурации.

2. Не учитывается адгезия между ледовым массивом и поверхностью трубки.
3. Не учитывается теплообмен с окружающим воздухом.
4. Температура по толщине льда принимается равной 0 °С.
5. Рассматривается обтекание одной трубки с замороженным массивом льда.

Было выдвинуто предположение, что интенсивность плавления льда определяется следующими физическими величинами: вязкостью воды $\mu = \text{Па} \cdot \text{с} = \text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$; массовой скоростью воды, обтекающей ледовую поверхность $\overline{\rho v} = \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; l – характерным размером; теплопроводностью воды $\lambda = \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К}) = \text{Дж}/(\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{К})$; теплоёмкостью воды $C_p = \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; температурным напором $\Delta T = \text{К}$; скрытой теплотой фазового перехода льда $r = \text{Дж}/\text{кг}$.

Так как коэффициент теплоотдачи является искомой величиной, то формируем следующую функцию:

$$\alpha = f(\mu \overline{\rho v} l \lambda C_p \Delta T r) \quad (2.39)$$

Для построения критериальных зависимостей воспользуемся способом, предложенным Рэлеем [107].

Согласно Рэлею α можно представить, как степенной комплекс:

$$\alpha = C \mu^a \overline{\rho v}^b l^c \lambda^d C_p^e \Delta T^f r^g \quad (2.40)$$

Для дальнейшего вывода необходимо представить размерности переменных в виде основных величин системы СИ. К основным величинам в системе СИ относятся L – длина (метр), M – масса (килограмм), T – время (секунда), θ – термодинамическая температура (кельвин), I – сила тока (ампер), I_v – сила света (кандела), n – количество вещества (моль). Для удобства воспользуемся системой $LM\theta N$, где N представляет собой упрощение в виде ввода отдельной величины (**не являющейся основной!**), которая в системе LMT может быть записана как L^2MT^{-2} [108].

Выразим величины в размерностях $LMTH\theta$, где L – длина (м), M – масса (кг), T – время (с), H – теплота (Дж), θ – температура (К):

$$L^{-2}T^{-1}H\theta^{-1} = L^{-1}MT^{-1a} \cdot T^{-1}ML^{-2b} \cdot L^c \cdot L^{-1}T^{-1}H\theta^{-1d} \cdot HM^{-1}\theta^{-1e} \cdot \theta^f \cdot HM^{-1g} \quad (2.41)$$

Далее составим систему линейных уравнений и выразим одни величины через другие:

$$\begin{cases} L: -2 = -a - 2b + c - d \\ M: 0 = a + b - e - g \\ T: -1 = -a - b - d \\ H: 1 = d + e + g \\ \theta: -1 = -d - e + f \end{cases}, \quad (2.42)$$

откуда $a = -b + e - f$; $b = b$; $c = b - 1$; $d = 1 - e + f$; $e = e$; $f = f$; $g = -f$.

Подставляем полученные значения в (2.40):

$$\alpha = C \cdot \mu^{-b+e-f} \bar{\rho} \bar{v} l^{b-1} \lambda^{1-e+f} C^e \Delta T^f r^{-f} \quad (2.43)$$

В итоге получаем:

$$\alpha = C \cdot \left(\frac{\lambda}{l}\right) \cdot \left(\frac{\bar{\rho} \bar{v} l}{\mu}\right)^b \cdot \left(\frac{C_p \mu}{\lambda}\right)^e \cdot \left(\frac{\lambda \Delta T}{\mu r}\right)^f \quad (2.44)$$

Группируем левые и правые части выражения (2.44) и в виде критериев подобия:

$$Nu = C \cdot Re^b Pr^e \left(\frac{Ste}{Pr}\right)^f \quad (2.45)$$

Так как:

$$\left(\frac{\lambda \Delta T}{\mu r}\right) = \frac{\frac{C_p \Delta T}{r}}{\frac{C_p \mu}{\lambda}} = \frac{\frac{\frac{H\theta}{M\theta}}{\frac{M}{H}}}{\frac{\frac{M}{H}}{\frac{M\theta L T}{H}}} = \frac{\frac{H\theta M}{M\theta H}}{\frac{H\theta M L T}{M L T H \theta}} = \frac{Ste}{Pr} \quad (2.46)$$

Комбинирование физических величин для получения безразмерных комплексов основывается на теореме Федермана-Бэкингема, она же вторая теорема подобия или π -теорема:

$$i = n - m, \quad (2.47)$$

где n – число размерных параметров, характеризующих процесс, m – число основных величин, i – минимальное число получаемых критериев.

В рассматриваемом случае:

$$i = n - m = 8 - 4 = 4 \quad (2.48)$$

Полученное уравнение включает в себя критерии Pr , Ste , Re , Nu , которые имеют следующий физический смысл:

Pr – число Прандтля. $Pr = \frac{v}{a} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{\lambda}{c_{pp}}}$ представляет собой меру подобия

температурных и скоростных полей в пленке жидкости;

Ste – число Стефана. $Ste = \frac{c_p \Delta T}{r}$ критерий подобия при плавлении – кристаллизации. Мера отношения явной теплоты, подводимой к веществу, претерпевающему фазовый переход, к скрытой теплоте фазового перехода;

Re – число Рейнольдса. $Re = \frac{\bar{\rho} v l}{\mu}$ представляет собой отношение сил инерции к силам вязкостного трения;

Nu – число Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи). $Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$ характеризует связь между интенсивностью теплоотдачи и температурным полем в пограничном слое потока;

В числа подобия входит характерный размер l , однако теория подобия не дает однозначного ответа, что должно быть использовано в качестве данной характеристики, обеспечивающей масштаб линейных размеров. В связи с этим, за линейный размер принято принимать тот, который наиболее отвечает физическому процессу [109]. Для задач, включающих в себя описание гидродинамических процессов в качестве характерного размера, принимают

эквивалентный диаметр, который для случая пленочного обтекания горизонтальной трубы соответствует учетверенной толщине пленки, поскольку:

$$d_{\text{эк}} = \frac{4\Pi\delta_{\text{пл}}}{\Pi} \text{ м}, \quad (2.49)$$

где Π – смоченный периметр, м;

$\delta_{\text{пл}}$ – средняя толщина пленки, м.

Тогда число $Re_{\text{пл}} = \frac{4\Gamma v}{\nu}$, число $Nu_{\text{пл}} = \frac{4\alpha\delta_{\text{пл}}}{\lambda}$ соответственно.

За определяющую температуру взята средняя температура жидкости, поступающая и стекающая после обтекания цилиндра со льдом:

$$t_{\text{ср}i} = \frac{t_{\text{вх}i} + t_{\text{вых}i}}{2} \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.50)$$

В процессе обтекания ледового массива к плотности орошения добавляется фракция расплавленного льда. Масса фракции льда m_p претерпевшей фазовый переход определялась по уравнению (2.35).

Таким образом, с учетом расплава льда, пленочное число Re для процесса пленочного плавления льда модифицируется:

$$Re_{\text{пл}} = \frac{4 \cdot \left(\frac{G + \left(\frac{m_{pi}}{2} \right)}{\rho \cdot 2 \cdot \Pi} \right)}{\left(\frac{\mu}{\rho} \right)} \quad (2.51)$$

Для каждого момента времени по мере плавления льда диаметр ледового массива d_{li} рассчитывается как

$$d_{li} = 2 \cdot \delta_{li} + d_{\text{тр}} \text{ м}, \quad (2.52)$$

где δ_{li} – толщина льда, м;

$d_{\text{тр}}$ – диаметр трубки, м.

В случае проведения аналитического расчета для каждого момента времени δ_{li} рассчитывается исходя из массового баланса.

$$\delta_{li} = \frac{\sqrt{\left[\frac{\left(\frac{m_{li}}{\rho_l} \right) + \left(\pi \cdot \left(\frac{d_{tr}}{2} \right)^2 \cdot \Pi \right)}{(\pi \Pi)} \right] \cdot 2 - d_{tr}}}{2} \text{ м}, \quad (2.53)$$

где ρ_l – плотность льда, кг/м³.

Для расчета средней толщины пленки можно воспользоваться зависимостью для пленочного обтекания труб, предложенной З.В. Семилет [53]

$$\delta_{cp} = 1,447 \sqrt[3]{\frac{\mu_B \Gamma_B}{1200 \gamma^2}} \text{ м} \quad (2.54)$$

С учетом фракции расплава с допущением о равномерности плавления льда по мере обтекания формула (2.54) модифицируется:

$$\delta_{cpi} = 1,447 \sqrt[3]{\frac{\mu \cdot \left(G_i + \left(\frac{m_{pi}}{2} \right) \cdot 3600 \right)}{1200 \gamma^2}} \text{ м} \quad (2.55)$$

Для нахождения численного значения коэффициента C и степеней критериев традиционно используется логарифмирование с дальнейшим нахождением тангенса угла наклона. В случае, когда определяющих критериев больше двух, то возможным решением для поиска показателей степеней является использование различного ПО, позволяющего провести анализ опытных данных.

В результате обработки опытных данных в ПО Microsoft Excel получено критериальное уравнение

$$Nu = 0,013 \cdot Re^{0,82} Pr^{0,513} Ste^{-0,183} \quad (2.56)$$

Сравнение с экспериментальными данными показало, что предложенное критериальное уравнение адекватно описывает плавление льда при плёночном обтекании (Рисунок 2.23).

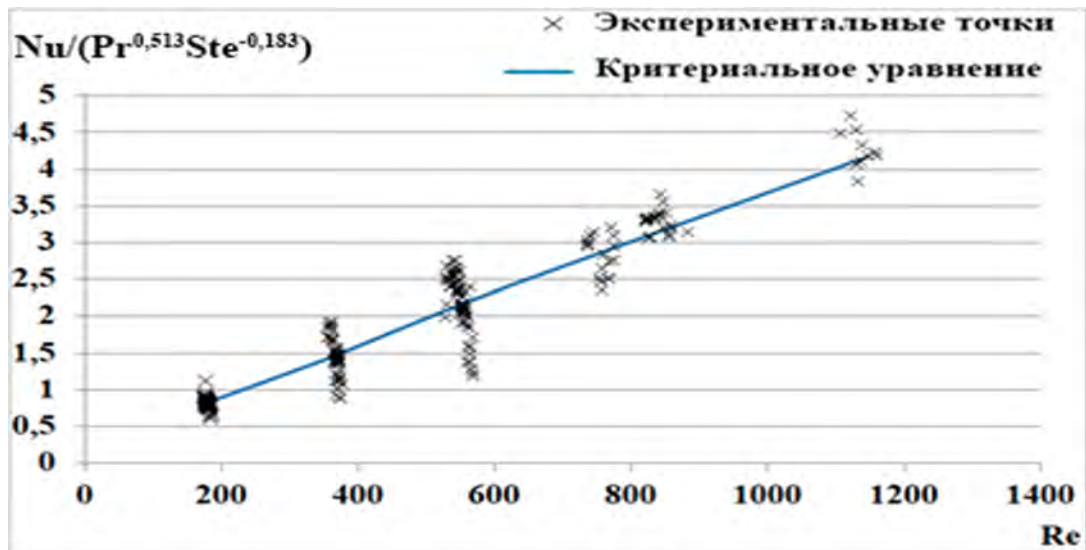


Рисунок 2.23 - Результаты экспериментов в форме зависимости между критериями подобия

Критерияльное уравнение, описывающее плавление ледового массива, замороженного на цилиндрической трубке, получено впервые и согласно теории подобия может быть применено в расчетах всех подобных явлений при выполнении условий однозначности. С его помощью можно проводить уточненный расчет пленочных ЛА. Доказанная применимость полученного критерияльного уравнения ограничена диапазонами плотностей орошения Γ_v от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и температур подаваемой на охлаждение воды от 20 до 60 °С.

2.3 Выводы по главе 2

1. Предложено наиболее рациональное техническое решение ЛА в виде башенной конструкции с коаксиальными змеевиками. Изготовлен макетный образец пленочного ЛА, разработана схема и сконструирован экспериментальный стенд для проведения исследований процессов тепломассообмена при различных режимах плавления льда.
2. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов плавления льда в льдоаккумуляторе с объёмным и плёночным режимами разрядки.

3. Проведены исследования и экспериментально подтверждено, что разработанная конструкция ЛА с плёночным механизмом теплоотвода обладает более высокой эффективностью по сравнению с аккумуляторами с объёмным плавлением. Значение плотности теплового потока, при плотности орошения $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и температуре подаваемой воды 60°C достигает $230 \text{ кВт}/\text{м}^2$, при этом максимальная плотность теплового потока активной зоны плавления достигала $1175 \text{ кВт}/\text{м}^2$.
4. Экспериментально подтверждена высокая интенсивность разработанного технического решения. Полученные значения осредненного по поверхности испарителя коэффициента теплоотдачи достигают значений свыше $6000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, что превосходит интенсивность аппаратов объёмного типа плавления, описанную в литературе ($150 - 850 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$).
5. Предложена эмпирическая зависимость для расчета отводимой тепловой нагрузки и температуры воды на выходе из пленочного ЛА для плотностей орошения от $0,5 \cdot 10^{-4}$ до $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и температур подаваемой воды от 20 до 60°C .
6. Впервые, при помощи метода анализа размерностей, получено критериальное уравнение, описывающие процесс плавления льда, замороженного на трубке при пленочном обтекании.

ГЛАВА 3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛЕНОЧНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА НА ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБКЕ

Для описания процессов, происходящих при пленочном обтекании цилиндрических ледовых поверхностей, можно воспользоваться программами, применяющими численные методы. Такими программами являются OpenFOAM, Comsol Multiphysics, Ansys Fluent и пр. Подобное ПО представляет собой набор различных решателей и пре-/постпроцессоров для моделирования течений жидкостей и газов с учетом турбулентности, межфазного взаимодействия, химических реакций, горения и аэроакустических эффектов. В качестве ПО для разработки модели пленочного обтекания цилиндрической ледовой структуры был выбран Comsol Multiphysics версии 6.2, как наиболее отвечающий требованиям поставленной задачи.

3.1 Построение геометрии расчетной области

Исследуемый процесс представляет собой совокупность двух физических явлений: обтекания тонкой плёнкой ледового цилиндра в поле гравитационных сил и плавление льда (задача Стефана) с конвективным переносом жидкой фазы на границе раздела. Схематично данный процесс изображен на рисунке 3.1.

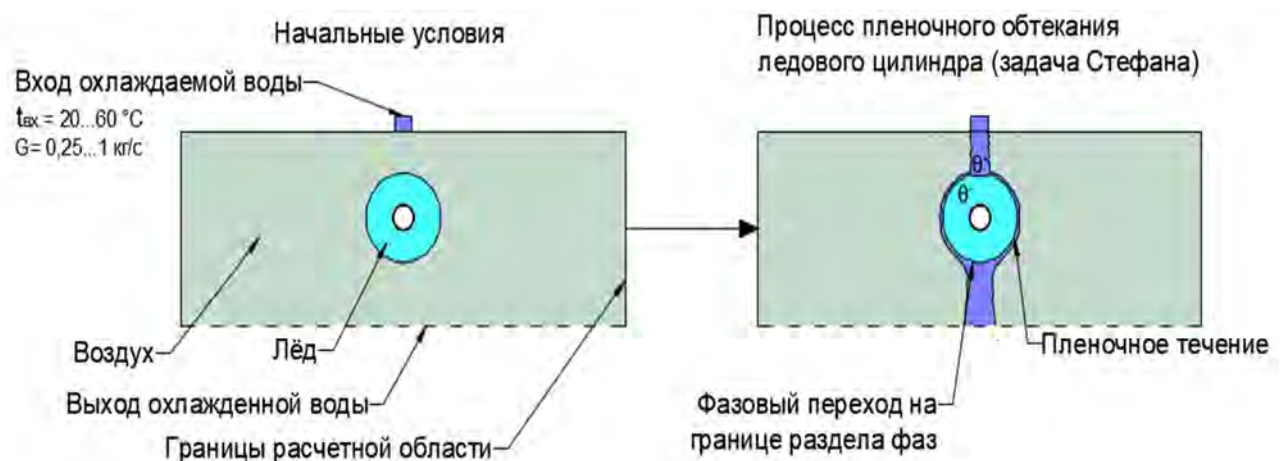


Рисунок 3.1 - Схема процесса плавления льда при обтекании трубки

На начальном этапе была разработана геометрия расчетной области в соответствии с физической моделью рассматриваемого процесса. Для создания

геометрии использовалась предустановленная в ПО CAD система. Геометрические характеристики расчетной области представлены на рисунке 3.2

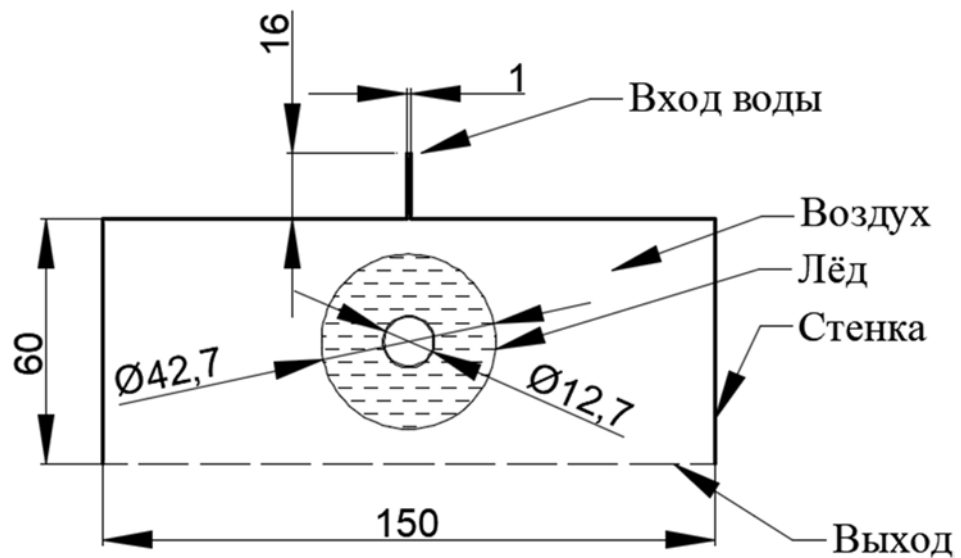


Рисунок 3.2 – Расчетная область

Дальнейшим этапом моделирования являлось создание элементной сетки расчетной области. Разбиение на конечные элементы производилось во встроенном сеточном генераторе. В сеточном генераторе задавались выборки геометрических элементов, соответствующие граничным условиям: сечения входа и выхода потока жидкости в расчётную область, зоны заполненные водой, льдом и воздухом, стенки. В результате разбиения получена сетка, состоящая из 90041 ячеек, общий вид сетки представлен на рисунке 3.3

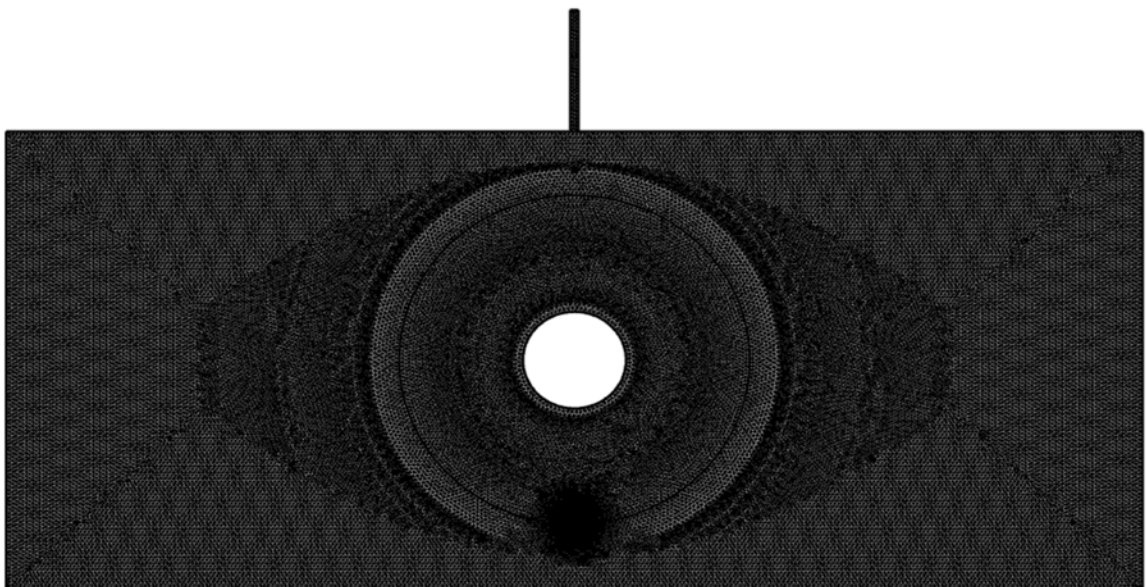


Рисунок 3.3 - Общий вид полученной сетки.

3.2 Математическая постановка задачи

В процессе составления расчётной модели был использован ряд допущений:

1. Моделируемый процесс тепломассообмена рассматривается на поперечном сечении первого слоя витков ЛА с замороженным льдом.
2. Представленная модель ограничена взаимодействием двух сред: воздух представлен, как идеальный газ с постоянными теплофизическими параметрами, вода - как двухфазная среда, жидкая фаза которой слабосжимаема, а её твёрдая фаза рассматривается при температуре фазового перехода, при этом в действительности в физический процесс вовлечено три среды: воздух, вода и лёд.
3. Расчётная область ограничена теплоизолированной стенкой.
4. Изменения давления на входе и выходе из расчётной области принимаются равными 0, расчёт проводится для атмосферного давления.
5. В процессе моделирования не учитывалась адгезия между ледовым массивом и теплообменной поверхностью испарителя. В реальности в процессе пленочного плавления льда часто наблюдается обрушение льда в донную область ЛА.

Задача обтекания цилиндра описана системой дифференциальных уравнений, включающей в себя уравнения сохранения энергии, неразрывности и сохранения импульса.

Уравнение неразрывности для несжимаемого потока:

$$\nabla(\rho \cdot \vec{v}) = S_m, \quad (3.1)$$

где ρ – плотность потока, \vec{v} – вектор скорости потока, S_m – источники генерации массы (для рассматриваемого процесса – дополнительная фракция жидкости, генерируемая вследствие плавления замороженного льда).

В процессе моделирования учитывались 3 фазы (лед, вода и воздух), в связи с этим объёмные доли фаз в каждой ячейке определялись следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (3.2)$$

В качестве первой фазы принимался воздух, второй – лед, третьей – вода.

Тогда уравнение концентраций для i -той фазы имеет следующий вид:

$$\nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = \sum_{j=1}^n (\dot{m}_{ji} - \dot{m}_{ij}), \quad (3.3)$$

где \dot{m}_{jl} – поток массы от фазы j к фазе i , \dot{m}_{lj} – поток массы от фазы i к фазе j , α_i – объёмная концентрация фазы i .

Для решения уравнений использована неявная разностная схема:

$$\frac{\alpha_i^{n+1}\rho_i^{n+1}-\alpha_i^n\rho_i^n}{\Delta t}V + \sum_f(\rho_i^{n+1}U_f^{n+1}\alpha_{i,f}^{n+1}) = [\sum_{j=1}^n(\dot{m}_{jl} - \dot{m}_{lj})]V, \quad (3.4)$$

где $n + 1$ – индекс текущего временного шага, n – индекс предыдущего временного шага, V – объём рассматриваемой ячейки, U_f^{n+1} – объёмный расход через поверхность ячейки, $\alpha_{i,f}^{n+1}$ – объёмная концентрация i -ого компонента, отнесенная к поверхности ячейки.

Объёмные доли фаз позволяют определить параметры многокомпонентного потока. Таким образом, плотность в элементе конечного объёма определяется как:

$$\rho = \alpha_{\text{воз}}\rho_{\text{воз}} + \alpha_{\text{в}}\rho_{\text{в}} + (1 - \alpha_{\text{в}} - \alpha_{\text{в}})\rho_{\text{л}} \quad (3.5)$$

$\alpha_{\text{воз}}$ – объёмная доля воздуха в рассматриваемом объёме; $\alpha_{\text{в}}$ – объёмная доля поступающей на орошение воды; $\rho_{\text{воз}}$, $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{в}}$ – плотности воздуха, льда и воды соответственно.

Подобное представление (3.5) обеспечило возможность решения уравнений сохранения импульса и энергии для многокомпонентного потока.

Уравнение сохранения импульса представлено в виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v}) + \nabla \cdot (\rho\vec{v}\vec{v}) - \nabla p + \nabla \cdot [\mu^*(\nabla\vec{v} + \nabla\vec{v}^T)] + \rho\vec{g} + \vec{F}, \quad (3.6)$$

где \vec{F} – сумма сил, действующих на поток, включающая в себя силы поверхностного натяжения между фазами; $\mu^* = \mu_L + \mu_T$ – результирующая динамическая вязкость, включающая молекулярную и турбулентную составляющие.

Уравнение (3.6) включает в себя объёмные концентрации α_i через вязкость μ^* и плотность ρ .

Силы поверхностного натяжения между двумя компонентами вводятся в виде:

$$\vec{F}_{\sigma,i} = \sigma_T \frac{\rho \vec{k} \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i - \rho_j)}, \quad (3.7)$$

где $k = \nabla \cdot \frac{\vec{n}}{|n|}$ – кривизна поверхности рассматриваемого элементарного объёма,

\vec{n} – вектор нормали к данной поверхности.

Для описания процесса пленочного обтекания была выбрана модель Флориана Ментера SST (англ. Menter's Shear Stress Transport).

Уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k :

$$\frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot ((\dot{v} + \sigma_k^* v_T) \nabla k) + P_k - \beta \cdot \omega k, \quad (3.8)$$

где \dot{v} – динамическая турбулентная вязкость.

Уравнение переноса удельной скорости диссипации кинетической энергии турбулентности ω :

$$\frac{D\omega}{Dt} = \nabla \cdot [(v + \sigma_\omega v_T) \nabla \omega] + \frac{\gamma}{v_T} P_k - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} (\nabla k) \cdot (\nabla \omega) \quad (3.9)$$

Переключение между моделями $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ осуществляется через функцию F_1 :

$$F_1 = \tanh(\arg_1^4) \quad (3.10)$$

Значение аргумента \arg_1 определяется из условия:

$$\arg_1 = \min(\max(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\dot{v}}{d^2\omega}), \frac{4\sigma_{\omega 2}k}{CD_{k\omega}d^2}) \quad (3.11)$$

$$CD_{k\omega} = \max(D_{k\omega}, 10^{-2}) \quad (3.12)$$

$$D_{k\omega} = \frac{2\sigma_{\omega 2}}{\omega} \cdot (\nabla k) \cdot (\nabla \omega), \quad (3.13)$$

где d – расстояние до стенки.

Недостатком стандартной модели $k - \omega$ является завышение значений турбулентности в застойных зонах. Для нивелирования данной особенности введены ограничивающие факторы генерации динамической турбулентной вязкости v_T и кинетической энергии турбулентности P_k :

$$P_k = \min(v_T S^2, 10\beta \cdot k\omega) \quad (3.14)$$

$$v_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega; SF_2)} \quad (3.15)$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (3.16)$$

$$\arg_2 = \max(\frac{2\sqrt{k}}{0.09\omega d}, \frac{500\dot{v}}{d^2\omega}) \quad (3.17)$$

$$S = \frac{1}{2} (\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y}) \quad (3.18)$$

Константы модели:

$$\sigma_{k1} = 0.85; \sigma_{k2} = 1; \sigma_{\omega 1} = 0.5; \sigma_{\omega 2} = 0.856; \beta_1 = 0.075; \beta_2 = 0.0828 \quad (3.19)$$

$$\beta^* = 0.09; k = 0.41; a_1 = 0.31; \Upsilon = \frac{\beta}{\beta^*} - \frac{\sigma \omega k^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad (3.20)$$

Константы с индексом 1 соответствуют модели $k - \varepsilon$, константы с индексом 2 соответствуют модели $k - \omega$, соответственно.

Уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) \quad (3.21)$$

Где, $\lambda_t = \frac{c_p \mu_T}{Pr_t}$ - турбулентная теплопроводность, $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$ - эффективная теплопроводность, $Pr_t \sim 1$ - турбулентное число Прандтля.

Вторым рассматриваемым процессом является задача Стефана, описывающая фазовое превращение лёд - вода. Особенностью решения подобных задач является то, что процесс фазового превращения происходит при заданной постоянной температуре плавления/кристаллизации T^* . Фазовый переход происходит на границе раздела жидкой и твердой фаз ψ , причём $\psi = \psi(t)$. Эта граница разделяет расчётную область Ω на две подобласти. Область $\Omega^+(t)$, занятая фазой, где температура превышает температуру кристаллизации, то есть $\Omega^+(t) = \{(x, y) \in \Omega, T(x, y, t) > T^*\}$. Соответственно, область $\Omega^-(t)$, занимаемая твёрдой фазой, имеет температуру ниже кристаллизации, $\Omega^-(t) = \{(x, y) \in \Omega, T(x, y, t) < T^*\}$. Соответствующие уравнения теплопроводности для твёрдой и жидкой фаз с учётом конвективного переноса в жидкости:

$$C_p^- \rho^- \frac{\partial T^-}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda^- \nabla T^-), (x, y, t) \in \Theta^- \quad (3.22)$$

$$C_p^+ \rho^+ \left(\frac{\partial T^+}{\partial t} + v \cdot \nabla T^+ \right) = \nabla \cdot (\lambda^+ \nabla T^+), (x, y, t) \in \Theta^+, \quad (3.23)$$

где $\Theta^- = \{(x, y, t) | (x, y) \in \Omega^-, 0 < t < t_{max}\}$;

$\Theta^+ = \{(x, y, t) | (x, y) \in \Omega^+, 0 < t < t_{max}\}$.

На границе контакта двух сред справедливым является предположение о непрерывности температуры, таким образом:

$$[T] = 0, (x, y) \in \psi \quad (3.24)$$

Фазовый переход происходит с выделением или поглощением определённого количества теплоты. Поэтому тепловой поток на границе ψ разрывен и определяется величиной:

$$[\lambda \Delta T] = -r_0 V_N, (x, y) \in \psi, \quad (3.25)$$

где r_0 - скрытая теплота фазового перехода, V_N - скорость движения границы фазового перехода по нормали.

Процесс фазового перехода происходит при постоянной температуре T^* . В связи с этим сама граница определяется в каждый момент следующим образом:

$$T(x, y, t) = T^*, (x, y) \in \psi \quad (3.26)$$

Таким образом, на границе фазового перехода выполняются граничные условия третьего рода.

Переход к энтальпийной форме записи с косвенной зависимостью от объёмных долей фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S, \quad (3.27)$$

где $H = h + r_0$ – энтальпия среды в рассматриваемом элементарном объёме, $S = S_m + S_t$ – “утечки энергии” в области границы раздела фаз, связанные с движением квазижидкого слоя, а также с турбулизацией потока в области границы раздела фаз.

Таким образом, составлена система уравнений, описывающая процесс пленочного обтекания плавящейся поверхности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot (\alpha_i \rho_i \vec{v}_i) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), i = \text{воз, в, л} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F} \\ \frac{Dk}{Dt} = \nabla \cdot ((v' + \sigma_k^* v_T) \nabla k) + P_k - \beta \cdot \omega k \\ \frac{D\omega}{Dt} = \nabla \cdot [(v + \sigma_\omega v_T) \nabla \omega] + \frac{\gamma}{v_T} P_k - \beta \omega^2 + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} (\nabla k) \cdot (\nabla \omega) \\ \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho H + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T), (x, y, t) \in \Theta^+ \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho H) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} H) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S, (x, y, t) \in \Theta^- \end{array} \right. \quad (3.28)$$

где $\Theta^- = \{(x, y, t) | (x, y) \in \Omega^-, 0 < t < t_{max}\}$, - часть расчетной области, занимаемая твердой фазой (льдом);

$\Theta^+ = \{(x, y, t) | (x, y) \in \Omega^+, 0 < t < t_{max}\}$ – остальная расчетная область.

Система (3.28) дополняется начальными и граничными условиями:

Начальные условия:

$$\begin{cases} T(0) = T_{0л}, (x, y, 0) \in \Omega^+ \\ T(0) = T_{0в0з}, (x, y, 0) \in \Omega^- \\ T(0) = T_{0в}, (x, y, 0) \in \Omega^- \\ p(0) = p_0; v(0) = v_0; k(0) = k_0; \omega(0) = \omega_0 \end{cases} \quad (3.29)$$

Граничные условия:

$$\begin{cases} [\lambda \Delta T] = -r_0 V_N, (x, y) \in \psi \\ G = G_{BX}; T = T_{BX}; p = p_{BX}, (x, y) \in f_{BX} \\ p = p_{БЫХ}, (x, y) \in f_{BX} \\ -\lambda \Delta T = 0, (x, y) \in f_{BX} \end{cases} \quad (3.30)$$

3.3 Обработка результатов моделирования

Для отслеживания изменения площади поверхности ледового массива в каждый момент времени необходимо проводить интегрирование границы ледового цилиндра. В ПО Comsol Multiphysics это реализуется при помощи функции integration (название оператора данной функции comp1.intop1(1)) и выбора соответствующих границ окружности - 13,14,17,20 (рисунок 3.4).

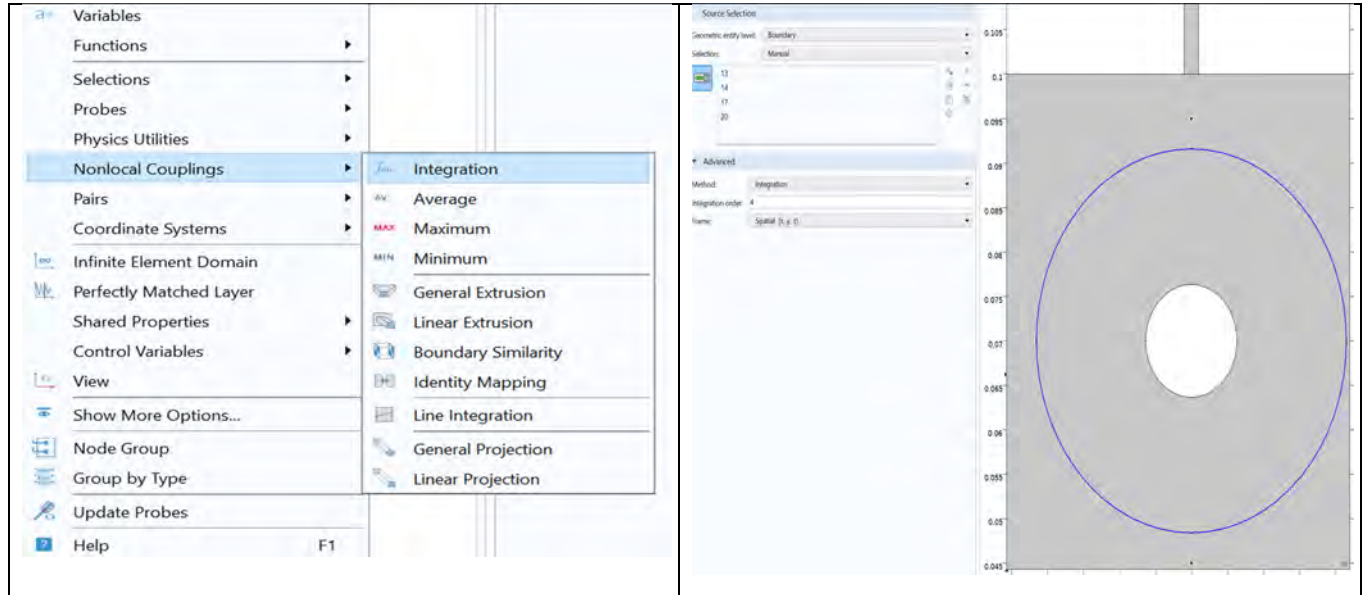


Рисунок 3.4 – Процесс выбора границ для оператора comp1.intop1(1)

Для оценки изменения площади боковой поверхности используется формула:

$$F_i = \text{comp1.intop1(1)} \cdot L_{\text{сл}} \text{ м}^2, \quad (3.31)$$

где $L_{\text{сл}}$ - длина единичного слоя витков 2,6 м.

Для вывода полученных значений в виде таблицы необходимо выбрать функцию Global Variable Probe 1 и в поле expression вписать формулу (3.31).

Для определения среднего значения плотности теплового потока используется переменная `ht.ntflux`. Для определения поверхности, на которой происходит измерение плотности теплового потока её необходимо задать при помощи функции Boundary Probe 1 и выбора границ окружности - 13,14,17,20 (рисунок 3.5)

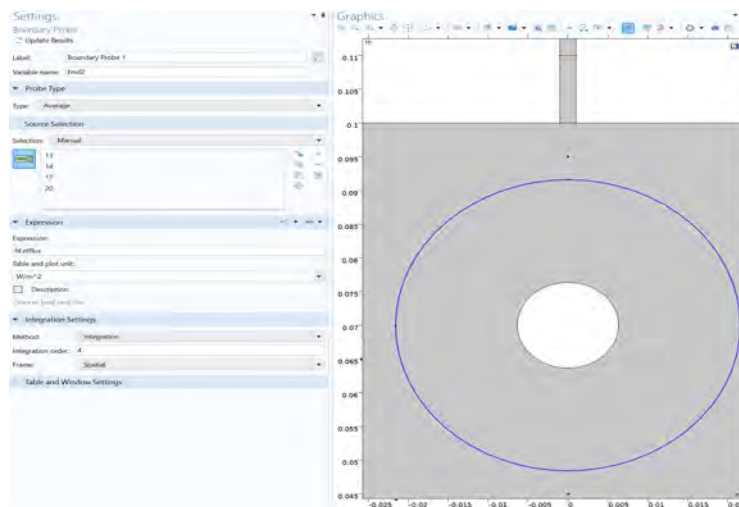


Рисунок 3.5 – Выбор границ для функции `ht.ntflux`

Тогда отводимая тепловая нагрузка:

$$Q_{\text{сл}i} = \text{ht. ntflux} \cdot F_i \text{ Вт} \quad (3.32)$$

Для определения массы льда в ледовом массиве необходимо снова воспользоваться функцией `integration`, при этом в качестве зоны интегрирования выбирается область (Domain 4) внутри ледового цилиндра (рисунок 3.6)

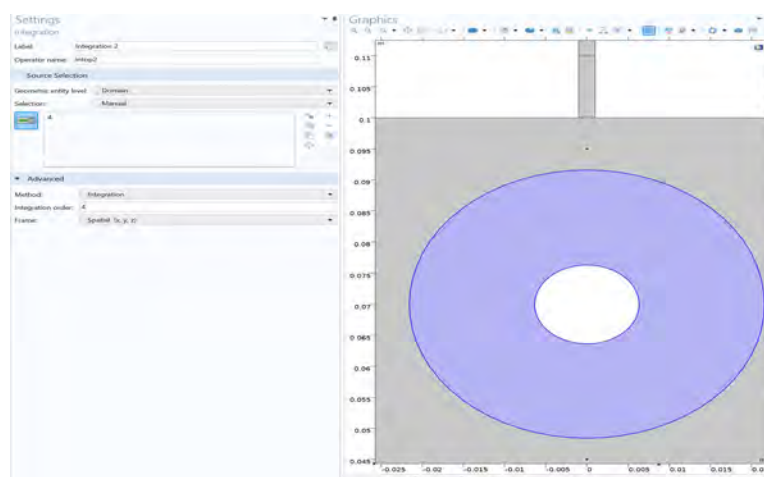


Рисунок 3.6 – Процесс выбора границ для оператора comp1.intop2 (1)

Данному оператору присваивается название comp1.intop2(1). Для расчета массы льда в момент времени τ_i в функции Global Variable Probe 2 необходимо задать следующую формулу:

$$m_{\text{льда}_i} = \text{comp1.intop2}(1) \cdot L_{\text{сл}} \cdot \rho_{\text{льда}} \text{ кг} \quad (3.33)$$

Для определения осредненного по реальной в i -тый момент времени поверхности льда коэффициента $\alpha_{\text{л}_i}$ теплоотдачи можно воспользоваться следующей формулой:

$$\alpha_{\text{л}_i} = \frac{\text{ht.ntflux}}{\left(\frac{\left(\left(\frac{\text{ht.ntflux} \cdot F_i}{C_{\text{Рводы}} \cdot G_{\text{воды}}} - t_{\text{вх}} \right) \cdot (-1) \right) + t_{\text{вх}}}{2} - t_{\text{льда}} \right)} \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (3.34)$$

Для вывода значений времени, соответствующих каждой итерации, в таблицу в функции Global Variable Probe 3 необходимо в поле expression задать переменную t .

Полученные в результате процесса моделирования значения в виде таблицы экспортировались в ПО Microsoft Excel.

3.4 Анализ результатов численного моделирования

Визуализация процесса в среде численного моделирования представлена на рисунках 3.7 и 3.8. На рисунке 3.7 представлен пример поля распределения концентраций воды, льда и воздуха, а также линии изотерм для режима $t_{\text{вх}} = 20^\circ \text{C}$,

$\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ в различные моменты времени. Синим цветом изображена вода, красным окружающий воздух, белым изображен лёд на теплоизолированной (по условиям задачи) трубке, линиями показаны изотермы.

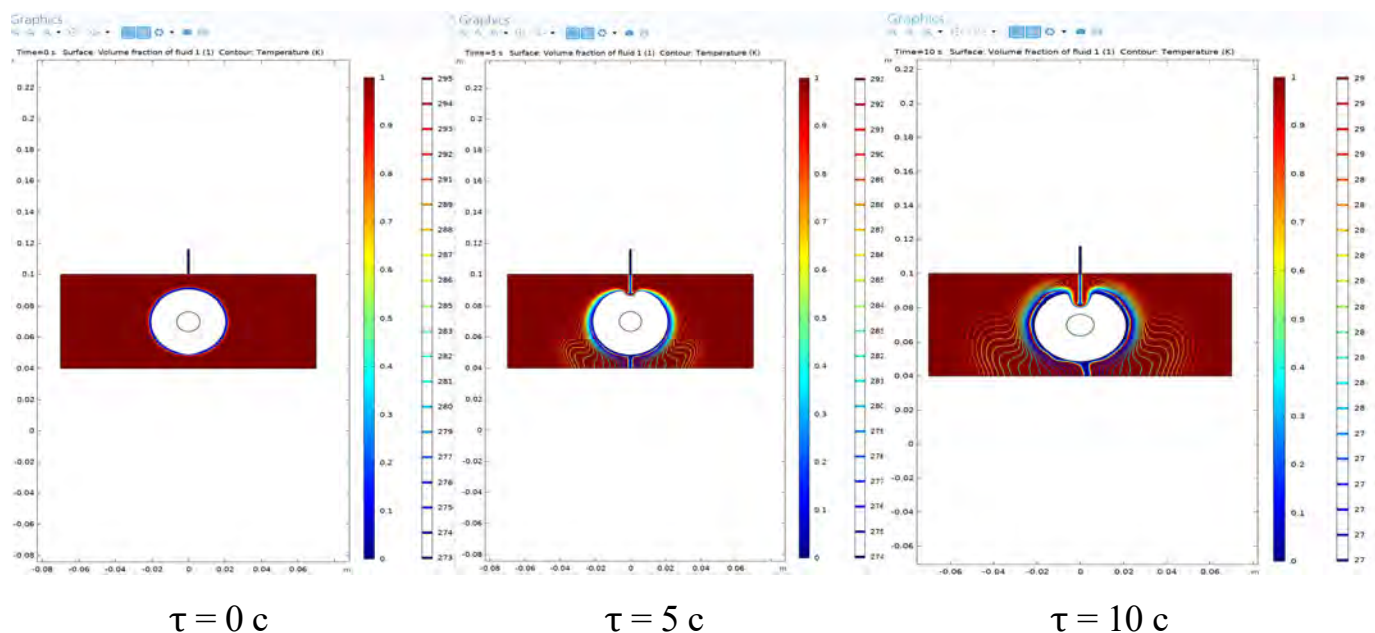


Рисунок 3.7 – Поле распределения объёмных концентраций воды, воздуха при обтекании ледового цилиндра и изотермы для режима

На рисунке 3.8 представлен пример поля распределение скоростей для режима $t_{\text{вх}}=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\Gamma_v = 0,5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$ для различных временных промежутков.

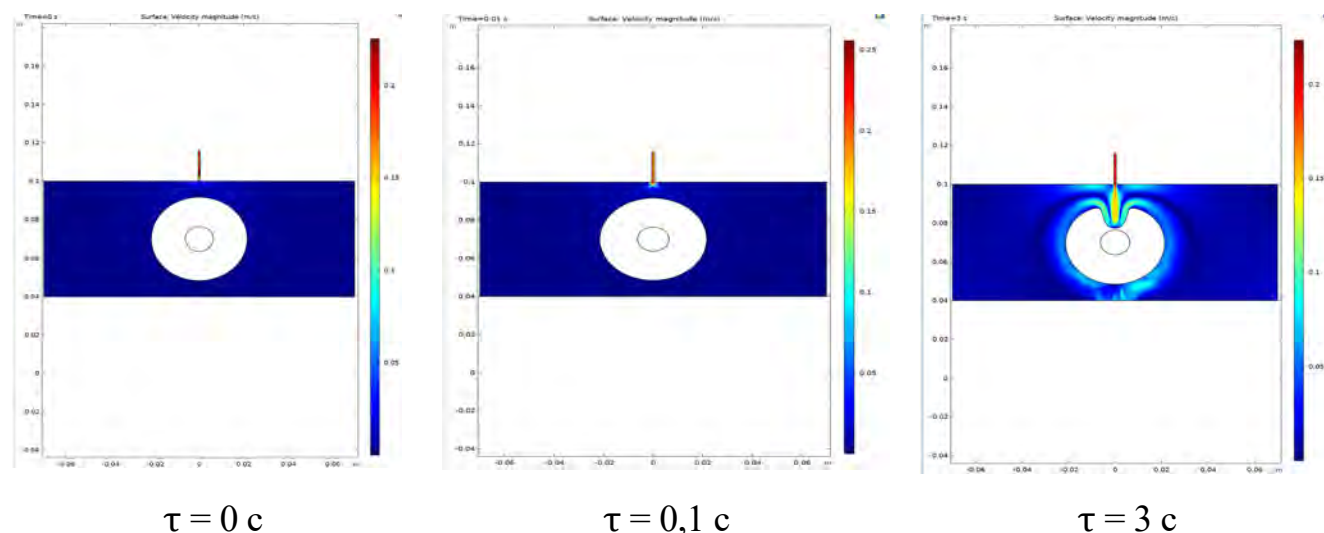


Рисунок 3.8 – Поле скоростей в расчетной области

В результате проведенного математического моделирования установлены значения осредненного по реальной в i -тый момент времени поверхности льда

коэффициента теплоотдачи $\alpha_{л_i}$ от охлаждаемой воды ко льду. Необходимо отметить, что в представленной модели данные значения практически не зависели от разности температур между охлаждаемой водой и ледовым массивом, а изменялись исключительно от значений расхода жидкости, подаваемой на охлаждение (рисунок 3,9).

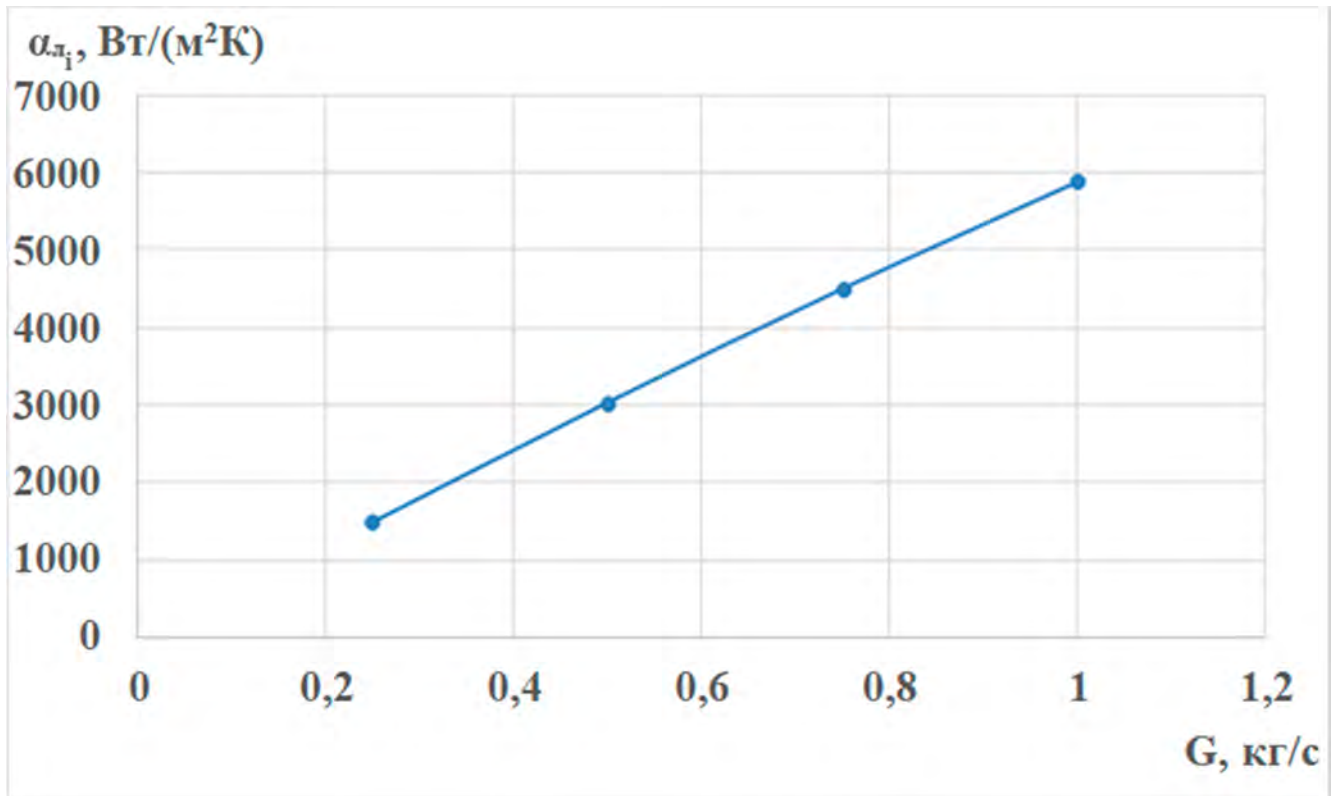


Рисунок 3.9 – Зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода подаваемой на охлаждение воды

Согласно данным, полученным в результате математического моделирования, применение пленочного механизма обтекания ледовых поверхностей позволяет существенно интенсифицировать процесс плавления льда. Значения коэффициента теплоотдачи в несколько раз, а для наиболее интенсивного режима более, чем на порядок, превышают значения аналогичного показателя, описанные в литературе для льдоаккумуляторов объёмного типа плавления (150 – 850 Вт/(м²·К))

Адекватность разработанной математической модели подтверждается сопоставлением полученных при помощи численного моделирования данных с результатами проведенных экспериментальных исследований, представленных в

главе 2. В связи с высокой нестационарностью протекающих процессов сравнение производилось по значениям тепловой нагрузки для первого слоя витков в момент времени $\tau = 2$ с (рисунок 3.10). По оси абсцисс представлено значение расходов подаваемой на охлаждение воды, по оси ординат значение тепловой нагрузки. Сплошной линией представлены экспериментальные результаты исследований, штриховой – данные, полученные в результате численного моделирования.

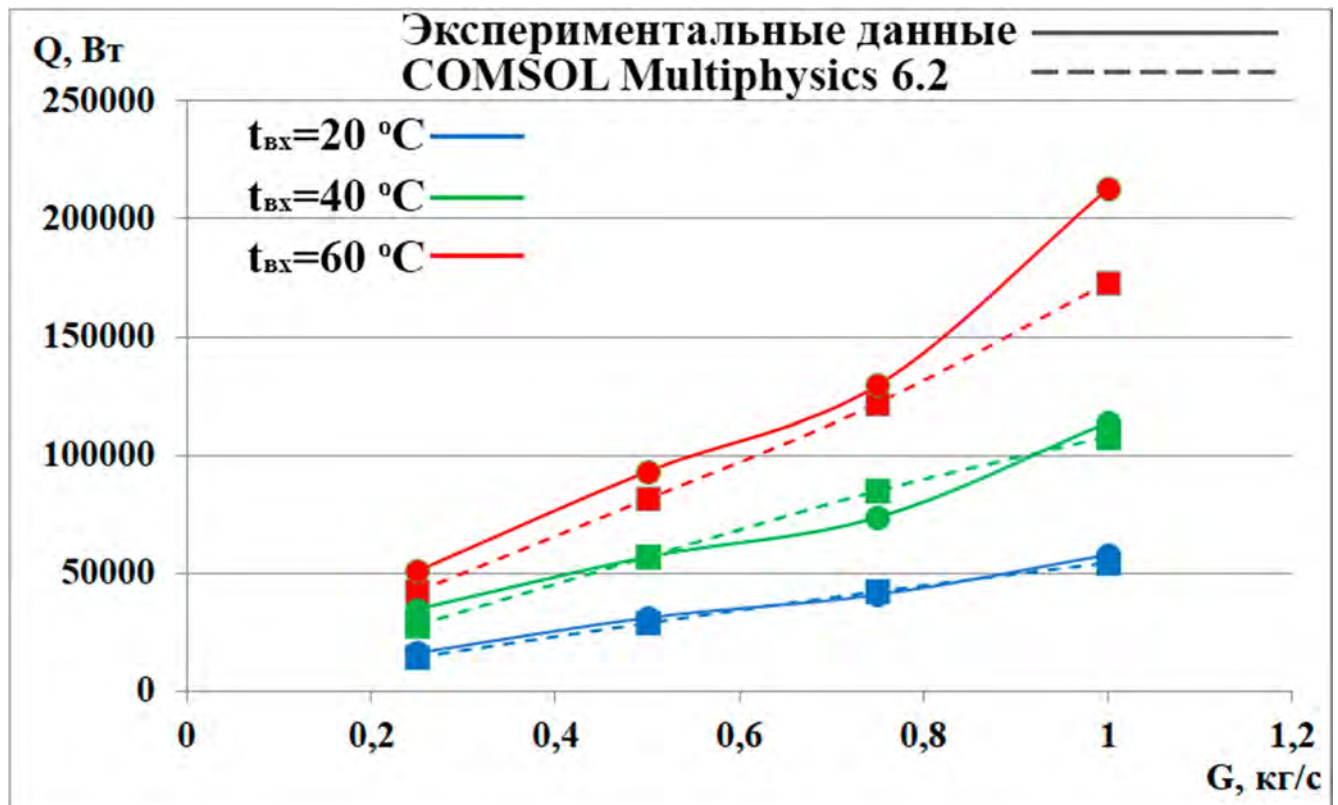


Рисунок 3.10 – Сравнение результатов экспериментов и численного моделирования.

Сравнение экспериментальных и расчётных данных показало достаточно высокое совпадение, однако для некоторых режимов отклонение результатов моделирования достигало 20%. Данное расхождение объясняется высокой степенью нестационарности процессов, происходящих в пленочном ЛА.

Разработанная математическая модель описывает физику процессов, происходящих при пленочном обтекании ледового массива, замороженного на слое витков ЛА и может быть использована для масштабирования и прогнозирования интенсивности плавления льда при различных режимных параметрах- температурах и расходах подаваемой на охлаждение воды.

3.5 Выводы по главе 3

1. При помощи численных методов разработана математическая модель пленочного обтекания ледового массива, замороженного на трубке, которая описывает физику явления и коррелирует с экспериментальными исследованиями.
2. Полученные значения коэффициента теплоотдачи подтверждают высокую эффективность применения пленочного механизма обтекания в сравнении с объёмным плавлением.
3. Разработанная математическая модель может быть использована для прогнозирования интенсивности плавления льда при различных режимных параметрах - температурах и расходах подаваемой на охлаждение воды.

ГЛАВА 4. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ И ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛЕНОЧНЫХ ЛЬДОАККУМУЛЯТОРОВ

4.1 Определение перспективных направлений применения пленочных льдоаккумуляторов

Для систем хладоснабжения предприятий пищевой промышленности основными **критериями** выбора вида льдоаккумуляторов выступают:

1. **Возможность прецизионного поддержания** температуры получаемой ледяной воды.
2. **Максимально возможный теплосъём**, позволяющий отводить пиковую тепловую нагрузку.
3. **Возможность регулирования** теплосъёма и **симметричный ответ ЛА** на динамически изменяющуюся тепловую нагрузку.

Каждый из представленных критериев зависит от интенсивности плавления льда в льдоаккумуляторе. Несмотря на это, производители льдоаккумуляторов, в большинстве случаев, не указывают в своих информационных материалах значение коэффициента теплоотдачи или минимально допустимое время стаивания. Отсутствие подобных сведений не позволяет спрогнозировать поведение ЛА в случае нештатной тепловой нагрузки.

Благодаря крайне высокой интенсивности плавления льда, обеспечиваемой пленочным механизмом обтекания, в плёночных ЛА возможно за короткий промежуток времени отводить тепловые нагрузки более чем на порядок превышающие теплосъём в льдоаккумуляторах объёмного типа плавления с одной и той же поверхности теплообмена (рисунок 4.1). Благодаря этому, обеспечивается возможность прецизионного поддержания температуры воды на выходе.

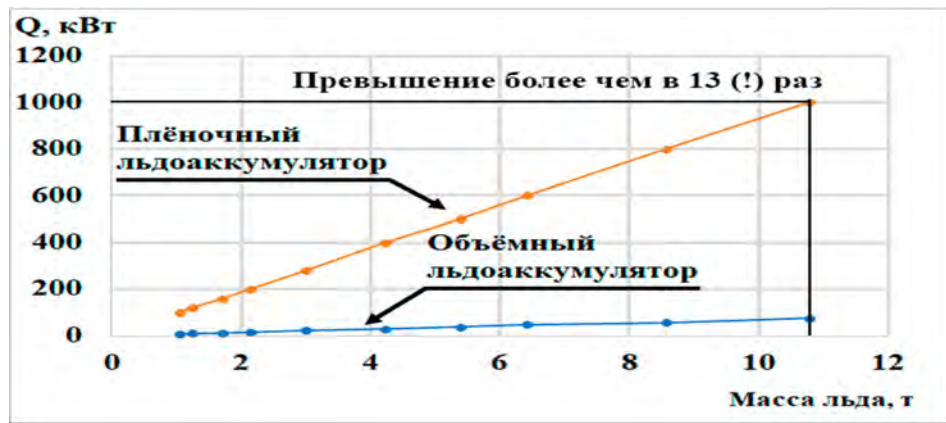


Рисунок 4.1 - Зависимость отводимой тепловой нагрузки в объемном и пленочном ЛА от массы намороженного льда

Интенсивность плавления льда при пленочном режиме плавления определяется исключительно величиной действующей тепловой нагрузки. Таким образом, разработанный аппарат автоматически отвечает на её динамическое изменение, что существенно упрощает эксплуатацию ЛА данного типа. Длительность разрядки определяется исключительно величиной тепловой нагрузки и массой накопленного льда, что подтверждено экспериментально. На рисунке 4.2 представлены графики тепловой нагрузки для режима $G = 1$ кг/с и различных температур подаваемой на охлаждение воды. Красным контуром показан необходимый уровень отводимой тепловой нагрузки, синей – тепловая нагрузка, отводимая в пленочном льдоаккумуляторе.

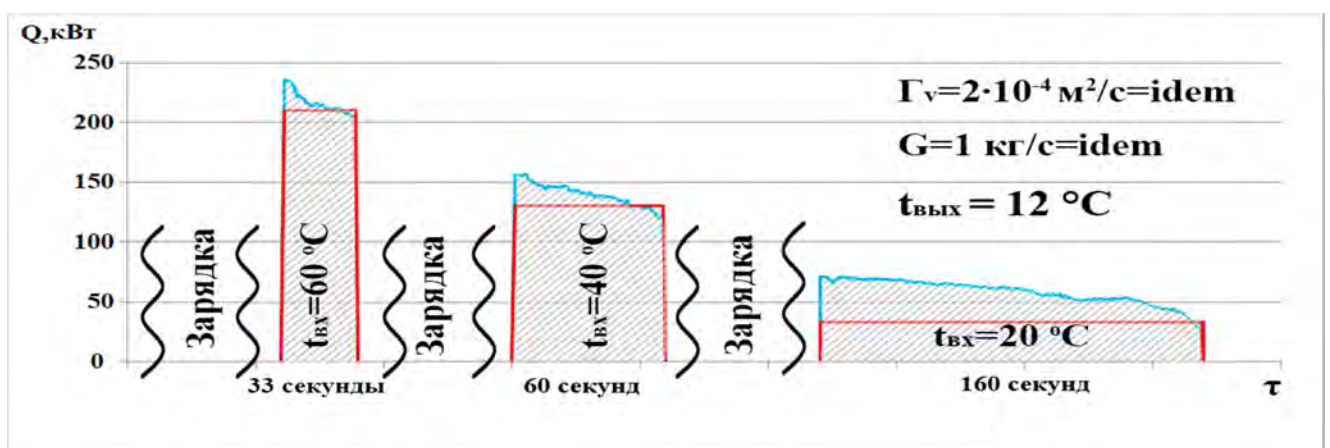


Рисунок 4.2 - Продолжительность разрядки пленочного ЛА при фиксированном значении расхода $G = 1$ кг/с и различных температурах подаваемой воды при массе накопленного льда 32 кг.

Таким образом, разработанный ЛА полностью отвечает требуемым критериям.

В результате обобщения экспериментальных и полученных из обзора научно – технической литературы данных представлена диаграмма, определяющая зоны рационального использования различного типа льдоаккумуляторов в зависимости от температуры воды, подаваемой на охлаждение и удельного объёмного расхода (рисунок 4.3). По оси абсцисс представлено значение удельного объёмного расхода подаваемой на охлаждение воды, по оси ординат - температура подаваемой на охлаждение воды.



Рисунок 4.3 - Диаграмма зон рационального использования различного типа льдоаккумуляторов.

Как видно из представленной диаграммы, пленочные льдоаккумуляторы могут быть использованы в широком диапазоне температур и расходов подаваемой на охлаждение воды. Можно ожидать, что пленочные ЛА обеспечат теплосъём при подаче на охлаждение воды с температурой, превышающей 60 °C, так как в исследованных режимах наблюдался рост отводимой тепловой нагрузки по мере увеличения значений температур подаваемой воды и не было выявлено никаких предпосылок к перелому тренда. При этом длительность разрядки была ограничена только количеством накопленного льда.

Кроме того, пленочные льдоаккумуляторы могут быть использованы и в зонах, в которых традиционно применяются аппараты с плавлением в объёме. Это связано с тем, что интенсивность плавления льда в пленочных ЛА всегда будет

выше, чем в аппаратах с плавлением льда в объёме, даже при малой разности температур между льдом и охлаждаемой водой. Это связано с тем, что плёночное обтекание всегда характеризуется большим числом внутренних интенсифицирующих факторов, как то: периодический «срыв» ламинарного подслоя, волнообразование (от синусоидальных до ударных, покрытых сетью вторичных капиллярных волн) и горизонтально отрывное течение.

Несмотря на универсальность разработанного аппарата, наиболее явно преимущества плёночного ЛА раскрываются на температурных уровнях подаваемой на охлаждение воды свыше 20 °С. При таком характере нагрузок только льдоаккумуляторы плёночного типа способны обеспечивать полноценный теплосъём без задействования дополнительных систем интенсификации или вспомогательных холодильных установок.

Нагрузки такого характера встречаются на многих объектах молочной промышленности. К таким предприятиям можно отнести гормолзаводы со значительной степенью неравномерности тепловой нагрузки в течение суток (рисунок 4.4)

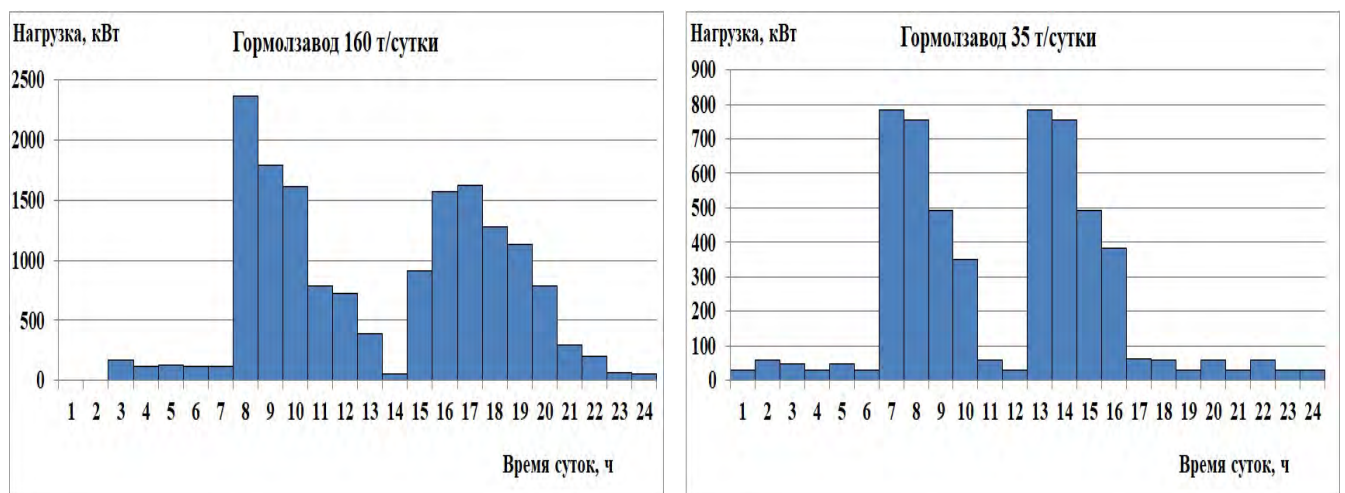


Рисунок 4.4 - Графики суточной тепловой нагрузки на городские молочные заводы производительностью по переработке молока 160 т/сутки и 35 т/сутки.

Как видно из приведенных графиков, в пиковые часы наблюдается резкий скачок тепловой нагрузки, что обусловлено технологическими процессами на молочном предприятии. К таким процессам относятся не только приемка и

охлаждение молока, но также и охлаждение жидких молочных продуктов после термической обработки. Для повышения энергоэффективности на предприятиях молочной промышленности применяют рекуперацию, т.е. охлаждение потоком, направляемым на термическую обработку. При этом жидкий молочный продукт после рекуперации, чаще всего необходимо доохлаждать. Температурные уровни некоторых технологических процессов обработки молока и молочной продукции представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Температурные уровни молочных продуктов на различных стадиях технологической обработки

№	Наименование технологического процесса	Температура, °С	
		Начало	Конец
1	Охлаждение молока для кефира	97	25
2	Охлаждение кефира	25	13
3	Охлаждение молока для ряженки	97	41
4	Охлаждение ряженки	41	23
5	Охлаждение молока для продукта «Бифилайф»	97	41
6	Охлаждение продукта «Бифилайф»	41	23
7	Охлаждение молока для продукта «Снежок»	97	41
8	Охлаждение продукта «Снежок»	41	23
9	Охлаждение творога	70	12
10	Охлаждение сливок в маслоцехе	60	8

Как видно из представленной таблицы, охлаждение молока и молочной продукции для некоторых из представленных процессов начинается с температурного уровня свыше 40–60 °С. При охлаждении продукции на данном температурном уровне происходит существенный нагрев охлаждающей воды, теплоту которой рационально отводить в пленочном ЛА.

Перспективным направлением применения пленочного ЛА также является мясная промышленность. Актуальность применения пленочного ЛА связана с наличием значительных пиковых нагрузок в различных технологических

процессах, как при производстве мясных изделий, так и при холодильной обработке мяса. В частности, согласно [110], процесс охлаждения варёных мясных продуктов, например, карбонада должен быть организован таким образом, чтобы в толще продукта температура снизилась до 50 °С не более, чем за 1,25 часа, а дальнейшее охлаждение с 50 до 12 °С за 7,5 часов и с 12 до 5 °С не более чем за 1,25 часа соответственно. При этом для охлаждения деликатесных варено – копченых изделий должен применяться воздух, так как прямой контакт с жидкими средами ухудшает качество и товарный вид конечного продукта. Однако применение воздухоохладителей с непосредственным кипением хладагента для охлаждения подобной продукции сопряжено с определенными техническими проблемами. В первую очередь это связано с тем, что температура воздуха в камерах с горячей продукцией в начальный период времени может превышать 50°С, что, несомненно, является пиковой нагрузкой на холодильную систему. Подобные условия могут приводить к значительному повышению давления хладагента, как на стороне кипения, так и на стороне конденсации, что с одной стороны, снижает энергетическую эффективность, а с другой является нештатным режимом эксплуатации холодильной системы и может привести к выходу её из строя. Дополнительным фактором, который необходимо учесть, является периодичность изменения тепловой нагрузки – её величина может измениться более чем в 10 раз за весь цикл охлаждения. Данное обстоятельство значительно усложняет управление и работу холодильной установки. В связи с этим рационально применять пленочные ЛА, для обеспечения подачи ледяной воды в воздухоохладитель в одностадийном промышленном цикле охлаждения. С одной стороны, это позволит нивелировать пиковые нагрузки, а с другой обеспечит стабильность работы холодильной установки.

Пленочные льдоаккумуляторы могут применяться для охлаждения в различных процессах пивоваренных и ликеро-водочных производств с периодическим циклом работы, как для охлаждения сусла, так и на других технологических этапах. В частности, при производстве пищевого спирта из зернового сырья, согласно технологии «мягкой» схемы водно–тепловой

обработки необходимо проводить охлаждение водно-зерновой смеси (замеса) после гидроферментативной обработки с температурных уровней 75 – 90°C до температуры осахаривания 60 °C (рисунок 4.5).

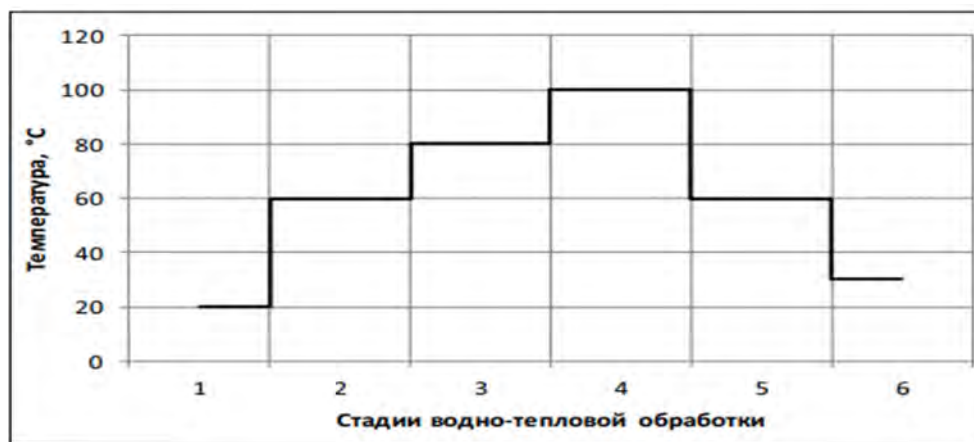


Рисунок 4.5 - Диаграмма изменения температурных режимов в условиях «мягкой» схемы разваривания: 1...2 – приготовление замеса; 2...3 – разжижение, 3...4 – разваривание; 4...5 – осахаривание; 5...6 – подача на брожение.

На следующем этапе перед подачей на брожение замес необходимо охладить до температур 30 - 35 °C. После этого в процессе брожения требуется обеспечить поддержание данного температурного уровня.

Возможным решением является использование в системах охлаждения ликеро – водочных предприятий различных градирен, однако они не всегда могут обеспечить охлаждение воды до требуемой температуры. Альтернативой выступает применение артезианской воды, однако это требует наличия скважины и установки насосов. Помимо этого на сегодняшний день для юридических лиц требуется оформление лицензии, согласно которой обеспечивается регулирование потребления воды из скважины. Применение пленочных льдоаккумуляторов позволит использовать оборотную воду для охлаждения спирта и спиртосодержащей продукции. [111]

Перспективной областью внедрения разрабатываемого ЛА является СКВ. Согласно [112] применение систем с льдоаккумуляцией обосновано, при пиковых тепловых нагрузках, превышающих в 2 – 3 раза и более среднюю суточную тепловую нагрузку на объекте охлаждения. При этом

эксплуатационные затраты напрямую зависят от эффективности использования различных тарифов системы учета электроэнергии. Согласно анализу, представленному в [113], показано, что эксплуатация льдоаккумулятора для охлаждения офисного здания при различных схемах применения позволяет экономить до 70% средств, при расходах на электроэнергию в случае использовании многотарифной системы учета.

Одним из факторов, непосредственно влияющих на качество работы СКВ, является глобальное потепление, что в перспективе, в связи с повышением температуры окружающей среды, приводит к необходимости модернизации действующих холодильных установок. Так, согласно [114] на территории Московского региона наблюдается увеличение среднегодовой, сезонной, годовой максимальной и минимальной температур воздуха. При этом увеличение среднегодовой температуры за декаду, согласно тренду, составляет $0,36\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ лет}$. Помимо этого, необходимо учитывать аномальные всплески температур воздуха, особенно в летний сезон. Так, для Москвы, за последние 100 лет такие всплески происходили в 1972, 1981, 2002 гг., а наиболее сильный произошел в июле 2010 г. В этот период значение среднемесячной температуры воздуха превысило средние показатели за всю историю наблюдений более чем на $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 4.6).

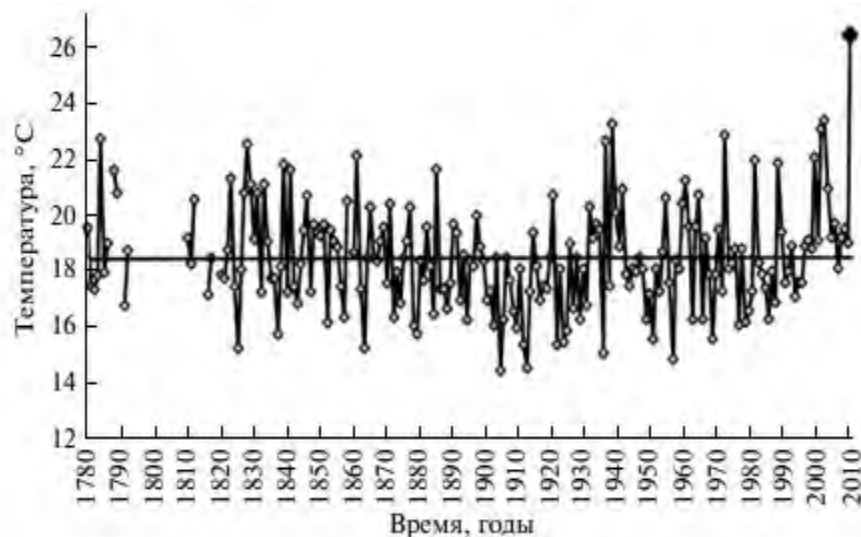


Рисунок 4.6 - Изменения среднемесячной температуры воздуха в Москве в июле, согласно метеорологическим наблюдениям с 1780 по 2010 год [115]

Подобные всплески температур являются нештатными нагрузками на системы кондиционирования воздуха, что приводит к падению эффективности у данных систем, а в наихудшем случае приводит к выходу их из строя. В подобных условиях возможность накопления льда в ночной период времени при более низкой температуре окружающей среды и последующей его разрядке, согласно графику тепловой нагрузки, является одним из наиболее рациональных способов применения ЛА с пленочным механизмом плавления льда.

Охлаждение систем с импульсным выделением теплоты также является одним из возможных направлений применения пленочных льдоаккумуляторов. К таким системам можно отнести оборудование, включающее в себя газовые лазеры. Внедрение пленочных ЛА наиболее актуально для замкнутой двухконтурной системы охлаждения, применяемой в лазерах, функционирующих непродолжительные периоды времени с существенными перерывами между рабочими циклами. В частности, широко распространена двухконтурная неавтономная система, в которой охлаждение происходит в теплообменном устройстве типа «вода» - «вода», где основной контур термостабилизируется протоком воды (рисунок 4.7)

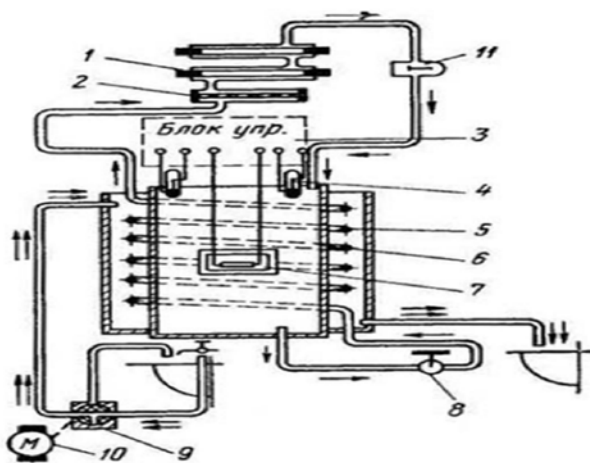


Рисунок 4.7 – двухконтурная система охлаждения лазера:

1 — лампа накачки; 2 — активное тело; 3 — блок управления; 4 — термоконтактор; 5 — теплообменник; 6 — бак; 7 — нагреватель; 8 — насос; 9 — кран; 10 — двигатель; 11 — гидрореле.

В данной системе насос обеспечивает подачу жидкости внутреннего замкнутого контура из бака по шлангам к камере прибора, где она проходит по каналам вдоль лампы накачки и вдоль активного элемента. Пройдя камеру, жидкость попадает в противоточный теплообменник, где происходит охлаждение и затем сливается в бак. Внешний контур в данной системе — разомкнутый. Вода из магистрали поступает в теплообменник, отводит выделяющееся при работе лазера тепло, а затем направляется в слив [116]. Подобный подход подразумевает использование значительного количества проточной воды. Использование пленочного ЛА в таких системах позволит отказаться от второго контура, а интенсивность теплосъёма увеличится за счет поступления на охлаждение лазера ледяной воды.

4.2 Оценка экономической эффективности применения пленочного льдоаккумулятора

Оценка экономической эффективности является важнейшим показателем перспективности применения разработки. Для получения сравнительных характеристик необходимо произвести оценку капитальных и эксплуатационных затрат для оборудования, применяемого в системах охлаждения на объекте пищевых производств [117,118]. В частности, настоящий расчет и оценка проводятся для следующих систем охлаждения молока:

1. Система охлаждения, состоящая из высокопроизводительного чиллера.
2. Система хладоснабжения, состоящая из чиллера и холодильной установки с пленочным льдоаккумулятором.

Расчет произведен для типового объекта низовой молочной промышленности с пиковой тепловой нагрузкой 100 кВт (рисунок 4.8).

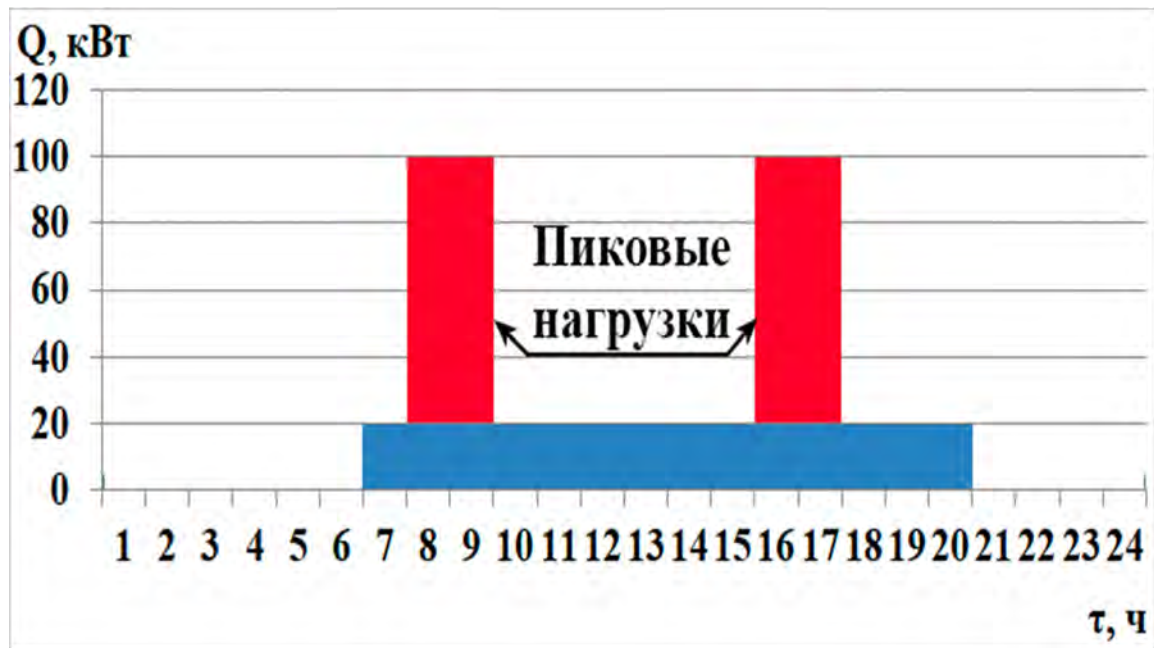


Рисунок 4.8 - Суточный график тепловой нагрузки низового предприятия молочной промышленности с пиковой тепловой нагрузкой 100 кВт

4.2.1. Подбор системы охлаждения для низового объекта молочной промышленности

Для системы охлаждения на базе высокопроизводительного чиллера без аккумулятора холода подбор производится исходя из пиковых значений тепловой нагрузки предприятия, что для рассматриваемого объекта составляет 100 кВт. Необходимо отметить, что большая часть современных чиллеров комплектуется системами регулирования холодопроизводительности (например, частотные преобразователи), что также отражено в данном расчете.

Для системы хладоснабжения, включающей в себя чиллер и холодильную установку с пленочным льдоаккумулятором необходимо провести расчет отводимой тепловой нагрузки, учитывая теплосъем обеспечиваемый льдоаккумулятором. Из рисунка 4.8 можно видеть, что уровень тепловой нагрузки имеет два характерных пика, при этом в остальное время работы фоновая нагрузка неизменна. Исходя из этого, холодопроизводительность чиллера должна соответствовать уровню фоновой нагрузки и составляет 20 кВт.

Для нивелирования пиковых нагрузок необходимо определить запас накапливаемой энергии в льдоаккумуляторе:

$$Q_{\text{ла}} = \sum(\tau_i \cdot Q_{\text{пик}_i} - \tau_i \cdot Q_0) \cdot 3600 = (4 \cdot 100 - 20 \cdot 4) \cdot 3600 = 1152 \text{ МДж}, \quad (4.1)$$

где $Q_{\text{пик}_i}$ – значения пиковых нагрузок, кВт;

Q_0 – холодопроизводительность чиллера, кВт;

τ_i – длительность пиковых нагрузок, ч.

Тогда масса накапливаемого льда в ЛА составляет:

$$m_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{ла}}}{r} = \frac{1152 \cdot 10^6}{335 \cdot 10^3} = 3438 \text{ кг} \quad (4.2)$$

Минимальная холодопроизводительность установки для намораживаемого льда может быть определена по тепловому балансу при условиях её круглосуточной работы. Таким образом, накопление льда может производиться в течение 20 часов за исключением времени действия пиковых нагрузок.

В связи с этим было выбрано время зарядки ЛА равное 20 часам. Производительность холодильного агрегата льдоаккумулятора при средней температуре кипения минус 15°C:

$$Q_{\text{ха}} = \frac{Q_{\text{ла}}}{3600 \cdot \tau_{\text{зар}}} = \frac{1152 \cdot 10^6}{3600 \cdot 20} = 16 \text{ кВт}, \quad (4.3)$$

где $\tau_{\text{зар}}$ – длительность процесса зарядки льдоаккумулятора, ч.

4.2.2. Оценка капитальных и эксплуатационных затрат

Подбор оборудования проведен по каталогам ведущих холодильных компаний, предоставляющих услуги по проектированию и установке льдоаккумуляционных систем и чиллеров. Исходные капитальные затраты на оборудование представлены на рисунке 4.9. Исходные данные для дальнейшего расчета представлены в таблице 4.2.

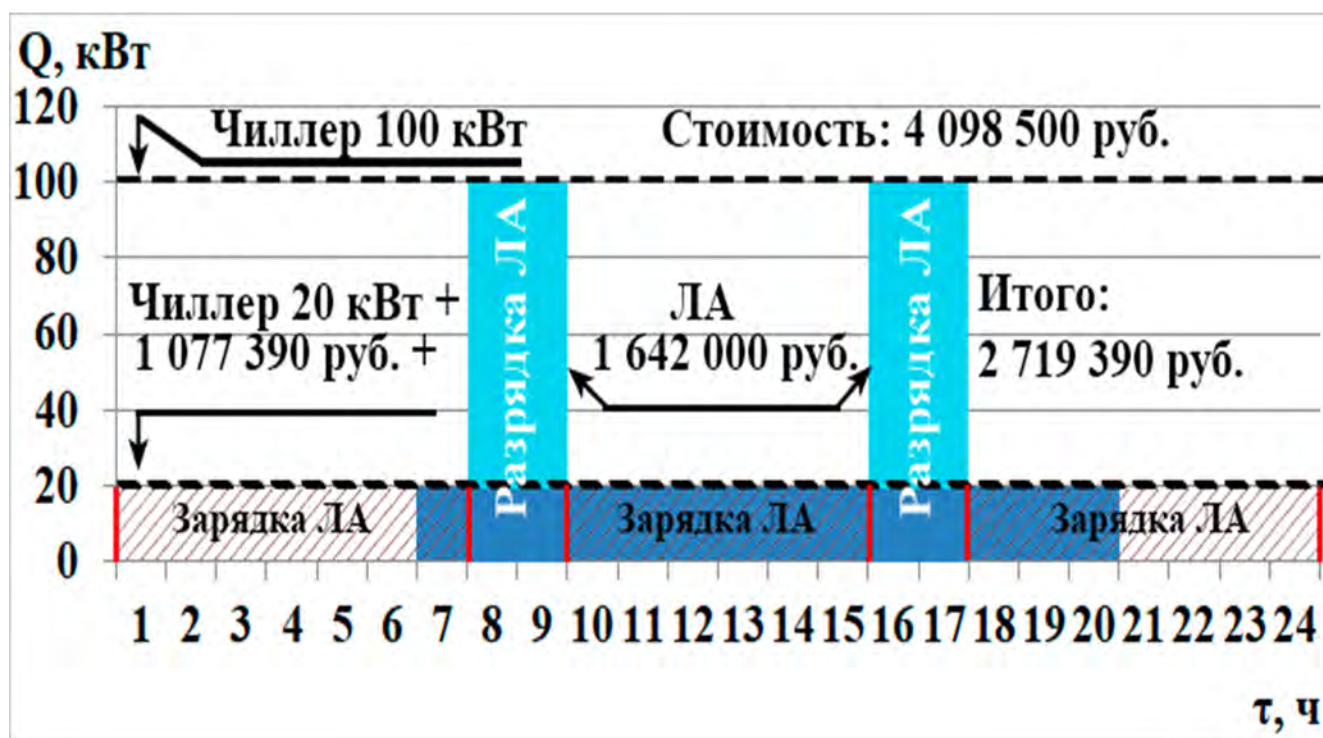


Рисунок 4.9 – Капитальные затраты и принцип холодоснабжения рассматриваемого объекта

Таблица 4.2 - Исходные данные для расчета экономических показателей

№ п/ п	Показатели	Вариант 1	Вариант 2	
		Высокопроизводительный чиллер, 100 кВт	Чиллер, 20 кВт	Холодильная установка с ЛА, 16 кВт
1	Балансовая стоимость оборудования, руб.	4 098 500	1 077 390	1 642 000
2	Балансовая стоимость помещений, руб.	500 000	500 000	-
3	Срок полезного использования оборудования согласно ОКОФ, лет.	7	7	7

Продолжение таблицы 4.2

4	Срок службы помещений, лет.	50	50	-
5	Количество рабочих (обслуживающий персонал)	2	1	1
6	Среднемесячная зарплата обслуживающего персонала на человек, руб.	30 000	30 000	30 000
7	Страховые взносы, %.	31,3	31,3	31,3
8	Годовая наработка оборудования, час.	5110	5110	7300
9	Холодопроизводительность, кВт.	100	20	16
10	Потребляемая мощность, кВт.	от 10 до 50	8	8

Расчетные показатели:

Сравнение капитальных затрат между двумя системами охлаждения:

$$\mathcal{E}_{\text{кап}} = \frac{Z_{\text{капч}}}{Z_{\text{капла}}} \cdot 100 \%, \quad (4.4)$$

где $Z_{\text{капч}}$ – капитальные затраты на систему с высокопроизводительным чиллером;

$Z_{\text{капла}}$ – капитальные затраты на систему хладоснабжения, состоящую из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА.

$$\mathcal{E}_{\text{кап}} = \frac{4\,098\,500}{2\,719\,390} \cdot 100 = 150,71\% \quad (4.5)$$

Можно видеть, что применение машинного охлаждения без использования льдоаккумуляции увеличит капитальные затраты на 50,71% по сравнению с системой с пленочным ЛА.

Расчет эксплуатационных затрат:

$$\mathcal{Z}_{\text{год}} = \mathcal{Z}_{\text{пл}} + \text{СВ} + \mathcal{Z}_{\text{эл}} + A_{\text{об}} + A_{\text{зд}} \text{ руб./год}, \quad (4.6)$$

где $\mathcal{Z}_{\text{пл}}$ – заработная плата обслуживающего персонала;

СВ – отчисления на страховые взносы;

$\mathcal{Z}_{\text{эл}}$ – затраты на электроэнергию;

$A_{\text{об}}$ – затраты на амортизацию оборудования;

$A_{\text{зд}}$ – затраты на амортизацию здания;

Годовая заработная плата:

$$\mathcal{Z}_{\text{пл}_\Gamma} = n_{\text{людей}} \cdot \mathcal{Z}_{\text{пл}} \cdot 12 \text{ руб./год}, \quad (4.7)$$

где $n_{\text{людей}}$ – количество сотрудников, обслуживающих холодильную систему;

Для системы с высокопроизводительным чиллером:

$$\mathcal{Z}_{\text{пл}_\text{ч}} = 2 \cdot 30\,000 \cdot 12 = 720\,000 \text{ руб./год} \quad (4.8)$$

Для системы хладоснабжения, состоящей из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА:

$$\mathcal{Z}_{\text{пл}_\text{ла}} = 2 \cdot 30\,000 \cdot 12 = 720\,000 \text{ руб./год} \quad (4.9)$$

Размер отчислений на страховые выплаты:

$$\text{СВ}_\Gamma = \mathcal{Z}_{\text{пл}_\Gamma} \cdot a \text{ руб./год}, \quad (4.10)$$

где: a – коэффициент, учитывающий страховые взносы, состоящие из отчислений в ПФР (22%), ФСС (2,9%), ФФОМС (5,1 %) и тарифа страховых взносов от несчастных случаев (1,3%).

Для системы с высокопроизводительным чиллером:

$$\text{СВ}_\text{ч} = 720\,000 \cdot 0,313 = 225\,360 \text{ руб./год} \quad (4.11)$$

Для системы хладоснабжения, состоящей из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА:

$$СВ_{ла} = 720\,000 \cdot 0,313 = 225\,360 \text{ руб./год} \quad (4.12)$$

Затраты на электроэнергию:

$$З_{эл} = N \cdot \tau \cdot C \text{ руб/год}, \quad (4.13)$$

где N – потребляемая мощность оборудования, кВт;

τ – время работы оборудования в год часы/год;

C –тариф на электроэнергию, руб./(кВт·ч).

Для всех представленных систем охлаждения используются тарифы на электроэнергию для промышленных потребителей согласно трехтарифной системе учета АО «Мосэнергосбыт» на примере г. Москвы (таблица 4.3) [119]

Таблица 4.3 - Цены на электрическую энергию поставляемую АО «Мосэнергосбыт» потребителям с максимальной мощностью менее 670 кВт.

Зона учета электроэнергии	Цена за кВт·ч, руб
Пиковая зона	10,926
Полупиковая зона	6,736
Ночная зона	5,023

Для системы с высокопроизводительным чиллером:

$$З_{элч} = 50 \cdot 3 \cdot 10,926 \cdot 365 + 50 \cdot 1 \cdot 6,736 \cdot 365 + 10 \cdot 6 \cdot 6,736 \cdot 365 + 10 \cdot 4 \cdot 10,926 \cdot 365 = 1\,028\,168,5 \text{ руб./год} \quad (4.14)$$

Для системы хладоснабжения, состоящей из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА:

$$З_{элч} = (8 \cdot 7 \cdot 10,926 \cdot 365 + 8 \cdot 7 \cdot 6,736 \cdot 365) + (8 \cdot 8 \cdot 5,023 \cdot 365 + 8 \cdot 8 \cdot 6,736 \cdot 365 + 8 \cdot 5 \cdot 10,926 \cdot 365) = 795\,221,12 \text{ руб./год} \quad (4.15)$$

Отчисления на амортизацию оборудования:

$$A_{об} = Ц_{об}/\tau_{пол} \text{ руб./год}, \quad (4.16)$$

где $Ц_{об}$ – балансовая стоимость оборудования, руб;

$\tau_{пол}$ – срок полезного использования оборудования согласно ОКОФ.

Для системы с высокопроизводительным чиллером:

$$A_{обч} = \frac{4\,098\,500}{7} = 585\,500 \text{ руб./год} \quad (4.17)$$

Для системы хладоснабжения, состоящей из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА:

$$A_{обла} = \frac{2\,719\,390}{7} = 388\,485 \text{ руб./год} \quad (4.18)$$

Отчисления на амортизацию зданий:

$$A_{зд} = \frac{Ц_{зд}}{\tau_{пом}} \text{ руб./год}, \quad (4.19)$$

где $Ц_{зд}$ – стоимость сооружений (холодильный цех), руб.;

$\tau_{пом}$ - длительность эксплуатации данного помещения, годы.

Для системы с высокопроизводительным чиллером:

$$A_{здч} = \frac{500\,000}{50} = 10\,000 \text{ руб./год} \quad (4.20)$$

Для системы хладоснабжения, состоящей из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА:

$$A_{здла} = \frac{500\,000}{50} = 10\,000 \text{ руб./год} \quad (4.21)$$

Годовые затраты:

Для системы с высокопроизводительным чиллером:

$$\begin{aligned} Z_{годч} &= 720\,000 + 225\,360 + 1\,028\,168,5 + 585\,500 + 10\,000 = \\ &= 2\,569\,028,5 \text{ руб./год} \end{aligned} \quad (4.22)$$

Для системы хладоснабжения, состоящей из чиллера и холодильной установки с пленочным ЛА:

$$\begin{aligned} Z_{годла} &= 720\,000 + 225\,360 + 795\,221,12 + 388\,485 + 10\,000 = \\ &= 2\,139\,066,12 \text{ руб./год} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Экономическая выгода от внедрения системы с льдоаккумуляцией:

$$\mathcal{E}_Г = Z_{годч} - Z_{годла} = 2\,569\,028,5 - 2\,139\,066,12 = 429\,962,38 \text{ руб./год} \quad (4.24)$$

В процентном соотношении:

$$\mathcal{E}_{\text{экспл}} = \frac{2\,569\,028,5}{2\,139\,066,12} \cdot 100 = 120,1\% \quad (4.25)$$

Можно видеть, что система с применением льдоаккумуляции для рассматриваемого объекта не только выгоднее с позиции капитальных затрат, но также и на 20,1 % позволяет уменьшить затраты, связанные с эксплуатацией.

4.3 Выводы по главе 4

1. Определена зона рационального использования пленочных ЛА. Разрабатываемые льдоаккумуляторы можно использовать во всем исследованном диапазоне расходов и температур, а также в зоне, где применяются ЛА с объёмным типом плавления.
2. Определены ключевые направления актуальные для применения пленочных ЛА: молочная, мясная промышленности, системы кондиционирования воздуха, а также системы с импульсным выделением теплоты (лазеры).
3. Проведенный экономический расчет показал целесообразность применения ЛА для предприятий с неравномерным распределением тепловых нагрузок, и преобладанием ярко выраженных пиков. В частности, для объекта низовой молочной промышленности с пиковыми тепловыми нагрузками до 100 кВт применение машинного охлаждения без использования льдоаккумуляции увеличит капитальные затраты на 50% и эксплуатационные затраты на 20% по сравнению с системой с пленочным ЛА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведены обзор и анализ существующих типов льдоаккумуляторов. Теоретически обоснована эффективность перехода от объёмного к плёночному режиму плавления льда при разрядке ЛА.
2. Разработана схема, создан экспериментальный стенд для проведения исследований процессов тепломассообмена на изготовленном макетном образце ЛА при различных режимах плавления льда. Обосновано наиболее рациональное техническое решение ЛА в виде башенной конструкции с коаксиальными змеевиками.
3. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов тепломассообмена при разрядке льдоаккумулятора в режимах плёночного обтекания, плавления в объёме жидкости и с использованием барботирования.
4. Проведены исследования и экспериментально подтверждено, что интенсивность теплоотвода в ЛА с плёночным механизмом обтекания более, чем в 10 раз выше, чем в льдоаккумуляторах с объёмным плавлением. Плотность теплового потока при плотности орошения $2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ и $t_{\text{вх}} = 60^\circ\text{C}$ составила $230 \text{ кВт}/\text{м}^2$, а максимальная плотность теплового потока активной зоны плавления достигает $1175 \text{ кВт}/\text{м}^2$.
5. Проведено обобщение экспериментальных данных в виде:
 - эмпирической зависимости для расчёта интенсивности теплоотвода в процессе разрядки и температуры охлаждённой воды на выходе из льдоаккумулятора. Коэффициент детерминации для представленной регрессии R^2 составляет 0,99. Средняя ошибка аппроксимации составляет 5,12 %.
 - критериального уравнения, полученного автором методом анализа размерности и впервые описывающего процесс плавления льда, замороженного на трубке при плёночном обтекании ниспадающим потоком воды:

$$\text{Nu} = 0,013 \cdot \text{Re}^{0,82} \text{Pr}^{0,513} \text{Ste}^{-0,183}$$
 - численной модели, описывающей плёночное плавление ледового массива, что позволяет масштабировать результаты исследования на ЛА с различной

геометрией теплообменных поверхностей. Отклонение экспериментальных данных от результатов расчетов по модели не превышало 20%.

6. Проведен оценочный расчет ожидаемой экономической эффективности системы хладоснабжения с пленочным ЛА в сравнении с системой на базе чиллера по соотношению капитальных и эксплуатационных затрат. Использование ЛА с плёночным режимом плавления позволяет сократить капитальные затраты на 50%, а эксплуатационные на 20% на типовом низовом объекте молочной промышленности. С наибольшей эффективностью новый тип льдоаккумуляторов может использоваться на предприятиях пищевой промышленности с высокой степенью неравномерности распределения суточной и сезонной тепловой нагрузки, а также в системах технологического кондиционирования, компенсации аварийных и нештатных скачков тепловой нагрузки, охлаждения систем с импульсным характером тепловыделений.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ**Условные обозначения**

a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

C_p – удельная теплоёмкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$;

d – диаметр, м;

G – массовый расход жидкости, $\text{кг}/\text{с}$;

L – длина, м;

l – характерный размер, м;

m – масса, кг;

q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

Q – тепловая нагрузка, Вт;

r – скрытая теплота плавления/кристаллизации льда, $335 \text{ кДж}/\text{кг}$;

t – температура, $^\circ\text{C}$;

α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{K})$;

Γ – массовая плотность орошения, $\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{ч})$, $(\text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}))$;

Γ_v – объёмная плотность орошения, $\text{м}^2/\text{с}$;

γ – удельный вес, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с}^2)$;

δ – толщина, м;

λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$;

μ – динамическая вязкость, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ν – кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$;

Π – смоченный периметр, м;

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

τ – время, с (ч);

Nu – число Нуссельта;

Pr – число Прандтля;

Re – число Рейнольдса;

Ste – число Стефана.

Индексы

В – вода;

ВОЗ – воздух;

ВХ – ВХОД;

ВЫХ – ВЫХОД;

зар – зарядка.

Л – лёд;

ла – льдоаккумулятор;

пик – пиковый;

пл – пленка жидкости;

р – расплав;

сл – слой витков;

ср – средний;

тр – труба;

хс – холодильная система;

ч – чиллер;

ЭК – эквивалентный.

Сокращения

ВИФ – вещества с изменяющейся фазой;

ЛА – льдоаккумулятор;

ПО – программное обеспечение;

СКВ – система кондиционирования воздуха;

ХТЭ – хранилище тепловой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бараненко, А. В. Итоги деятельности МАХ в 2019-2020 гг. и задачи на 2021-2022 гг. (Доклад президента Международной академии холода на 28 Общем годовом собрании 20 апреля 2021 г.) Список членов Международной академии холода (по состоянию на 20.04. 2021 г.-после собрания) / А.В. Бараненко // Вестник Международной академии холода. – 2021. – №. 2. – С. 4-12.
2. Порфирьев, Б. Н. Климат для людей, а не люди для климата / Б. Н. Порфирьев, А. А. Широв, А. Ю Колпаков // Эксперт. – 2020. – №. 31-34. – С. 44-47.
3. Макаров, И. А. Парижское соглашение по климату: влияние на мировую энергетику и вызовы для России/ И. А. Макаров, И. А. Степанов //Актуальные проблемы Европы. – 2018. – №. 1. – С. 77-97.
4. Andreeva, E. Y. Economic growth and ecology. The Paris Agreement / E. Y. Andreeva, M. O. Kleshnina // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2022. – Vol. 12. – №. 4-1. – P. 465-470.
5. Цветков, О. Б. Вступила в силу Кигалийская поправка к Монреальскому протоколу / О. Б. Цветков, Ю. А. Лаптев // Империя холода. – 2019. – №. 2. – С. 18-20.
6. Alva, G. An overview of thermal energy storage systems / G. Alva, Y. Lin, G. Fang // Energy. – 2018. – Vol. 144. – P. 341-378.
7. Dorgan, C. E. ASHRAE Design Guide for Cool Thermal Storage (RP-592) / C. E. Dorgan, J. S. Elleson // Transactions-american society of heating refrigerating and air conditioning engineers. – 1994. – Vol. 100. – P. 33-38.
8. Mehling, H. Heat and cold storage with PCM An up to date introduction into basics and applications / H. Mehling, L. F. Cabeza – Berlin: Springer, –2008. – 308 P.
9. Клименко, В. В. Газогидратные аккумуляторы природного холода в системах активного вентилирования плодоовощехранилищ/ В. В. Клименко, А. В. Скрипник, В. Н Корниенко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2011. – №. 2. – С. 16-19.

10. Ice storage test report / Stovall T. K. – Oak Ridge National Lab., Tennessee, USA: BALTIMORE AIRCOIL COMPANY (BAC), 1991. – 70 P.
11. Лъдоаккумулятор [Электронный ресурс]. - Режим доступа:<https://orelholodmash.ru/product/cat/ldoakkumulyatory/>
12. Антипов, А. В. Промышленные аккумуляторы холода / А. В. Антипов, Ц. Б. Дугаров // Молочная промышленность. – 2016. – № 7. – С. 14-16.
13. Ахметзянов, М. Т. Лъдоаккумулятор для первичного охлаждения молока / М.Т. Ахметзянов, А. В. Надточий //Холодильная техника. – 2008. – №. 4. – С. 24-25.
14. Сапожников, С.З. Тепловые насосы: учеб. пособие / С.З. Сапожников [и др.]; под ред. С.З Сапожникова. – СПб.: ПОЛИТЕХ – ПРЕСС, – 2022. – 92 с.
15. Bellas, I. Present and future applications of ice slurries./ I. Bellas, S.A. Tassou // International Journal of Refrigeration. –2005. – Vol. 28. – № 1. – P. 115–121.
16. Коршунов, А. Б. Аккумуляционные установки для охлаждения молока на фермах / А. Б. Коршунов, Б.П. Коршунов // Техника и технологии в животноводстве. – 2019. – №. 3. – С. 114-117.
17. Белозеров, Г. А. Исследование процесса охлаждения рыбы с использованием бинарного льда / Г. А. Белозеров // Холодильная техника. –2012. –№ 6. –С. 37–41.
18. Ковалева, Н.В. Аккумуляторы холода с использованием бинарного льда в системах кондиционирования воздуха / Н. В. Ковалева, А. А. Жаров, А. В. Борисенко, А. В. Валякина // Холодильная техника. – 2022. – № 4. – С. 233-243.
19. Laparoscopic ice slurry coolant for renal hypothermia / M. A. Orvieto [et al.] //The Journal of urology. – 2007. – Vol. 177. – №. 1. – P. 382-385.
20. MUELLER® MaximICE® ICE SLURRY APPLICATIONS [Электронный ресурс]. - Режим доступа:<https://genemco.com/products/mueller-maximice-ice-slurry-system-130-ton-eeld669f14?pdf=EELD669Fmuellericesystemliterature.pdf>

21. “Ice Ball” ice storage system [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.cryogel.world/ice-ball>
22. Reddy, R. M. The effect of PCM capsule material on the thermal energy storage system performance / R. M. Reddy, N. Nallusamy, K. H. Reddy // International Scholarly Research Notices. – 2014. – Vol. 2014. – P. 529280
23. Sekret, R. Developing a Cold Accumulator with a Capsule Bed Containing Water as a Phase-Change Material/ R. Sekret, P. Starzec //Energies. –2019. – Vol. 14. – № 9. – P. 2703.
24. Dogan, E. Experimental Investigation on the Effect of Ice Storage System on Electricity Consumption Cost for a Hypermarket. / E. Dogan, A. Necdet, A. Y. Çengel // Energy and Buildings. –2021. – Vol. 251. – P. 111368.
25. Кондакова, В.А. Использование естественного холода в качестве источника охлаждения помещений / В. А. Кондакова // Вестник науки. –2019. –Т.2. – №8 . – С. 44-46.
26. Кашуркин, А. Ю. О применимости естественного холода льда и снега в системах вентиляции и кондиционирования воздуха / А. Ю. Кашуркин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2017. – №. 6. – С. 35-39.
27. Skogsberg, K. The Sundsvall hospital snow storage / K. Skogsberg, B. Nordell // Cold Regions Science and Technology. – 2001. – Vol. 32. – №. 1. – P. 63-70.
28. Калюнов, В. С. Системы холодоснабжения с льдоаккумуляторами: реализация трех обязательных условий/ В. С. Калюнов, К. А. Тушев// Холодильная техника. – 2007. – № 8. – С. 14 - 19.
29. Energy optimization studies in a dairy industry ice bank tank./ P. R. Kumar [et. all] // International Journal of Ambient Energy. -2001. –Vol. 22. –№4. –P.181–188.

30. Демешко, А. А. Устройство для получения ледяной воды с аккумулярованием льда посредством импульсной наморозки / А. А. Демешко, С. А. Шишлов, А. Н. Шишлов // Вестник аграрной науки Дона. – 2021. – Т. 4. – №. 56. – С. 71-79.
31. Устройство для получения ледяной воды : пат. 197873 Рос. Федерация; № 200100747 / Демешко А. А. ; заявл. 09.01.2020; опубл. 03.06.2020 Бюл. № 16. 7 с.
32. Марков, В. С. Особенности получения ледяной воды с использованием насыпных льдоаккумуляторов / В.С. Марков, А.Г. Лазарев // Холодильная техника. - 2003. - Т. 92. - №5. - С. 33-35. doi: 10.17816/RF106661
33. Патент № 131465 Российская Федерация, МПК F25D 3/02 (2006.01). Аккумулятор холода: 2013119944/13 : заявл. 30.04.2013 : опубликовано 20.08.2013 / Наумов А.Л., Селиверстов Ю.М., Ефремов В.В. ; заявитель ООО "ТехноИнжПромСтрой". – 4 с. : ил. - Текст :непосредственный
34. Патент № 2484396 Российская Федерация, МПК F25D31/00 (2006.01), E04H5/10 (2006.01). Льдоаккумулятор для производства ледяной воды: 2012121493/13 : заявл. 25.05.2012 : опубликовано 10.06.2013 / Велюханов В.И., Гусева Г.В., Коваленко О.А., Коптелов А.К. -6с . : ил. - Текст : непосредственный
35. Патент № 2287749 Российская Федерация, МПК F25D1/00 (2006.01), F25C1/12 (2006.01). Установка для производства ледяной воды и аккумулярования холода: 2005116142/12: заявл. 27.05.2005: опубликовано 20.11.2006 / Гусев М.Р., Захаров Н.С. ; ООО "РИФИНГ". 11с: ил. - Текст :непосредственный
36. Mađerić, D. Impact of the pipe row spacing on the capacity of ice bank formed in a volume-limited water bath / D. Mađerić, B. Pavković, B. Delač, Z. Čarija // Thermal science and engineering progress. – 2022. – Vol. 30. – P. 101254
36. Heat transfer at ice-water interface under conditions of low flow velocities/ N. Li [et al.].// Journal of Hydrodynamics.- 2016.-№ 28, -p. 603–609.

37. Стефановский, В. М. Особенности плавления льда в воде при свободной конвекции / В. М. Стефановский // Научное обеспечение холодильной промышленности : Сборник научных трудов к 75-летию ГНУ ВНИХИ. – Москва : ГРАФ Сервис, 2005. – С. 240-246.
38. Selvnnes, H. Experimental charactersation of a cold thermal energy storage unit with a pillow-plate heat exchanger design / H. Selvnnes, Y. Allouche, A. Hafner // Applied Thermal Engineering. –2021. –Vol. 199. – P. 117507
39. Cold thermal energy storage for industrial CO2 refrigeration systems using phase change material: An experimental study/ H. Selvnnes [et al.] // Applied Thermal Engineering. –2022. –Vol. 212. –P. 118543
40. Expirimental investigations on the thermal performance of an ice storage system using twin concentric helical coil / H. E. Abdelrahman [et. al] // Applied thermal Engineering. –2020. –Vol. 179. –P. 115737.
41. Чернобыльский, И.И. Машины и аппараты химических производств./ Чернобыльский, И.И. [и др.] – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1975. – 456 с.
42. Flow Characteristics and Heat-Transfer Enhancement of Air Agitation in Ice Storage Air Conditioning Systems / Yang X. [et al.] // Energies. -2022. –Vol. 15. –P. 5918.
43. Бобков, В.А. Производство и применение льда Текст. // В.А. Бобков. –М.: Пищевая промышленность, 1977.- 230 с
44. Петров, В.И. Оценка интенсивности подачи воздуха в аккумуляторы льда для ускорения его таяния / В. И. Петров // Вестник МАХ. – 2010. – №. 4. – С. 35-37.
45. THERMAL ICE STORAGE: Application & Design Guide [Электронный ресурс].
- Режим доступа: <https://www.evapco.com/sites/evapco.com/files/2022-06/Thermal%20Ice%20Storage%20Application%20%26%20Design%20Guide.pdf>

46. Интенсификация тепломассообмена в процессе разрядки льдоаккумуляторов / Г. Ю. Гончарова [и др.] // Молочная промышленность. – 2022. – № 10. – С. 18-21.
47. Рекомендации по проектированию аккумуляторов холода/ Н.Г. Креймер [и др.] // Холодильная техника. –1981. –№1. –С. 47 – 51
48. Исследование процесса разрядки льдоаккумулятора с пленочным обтеканием плавящейся поверхности / Г. Ю. Гончарова [и др.] // Вестник машиностроения. – 2023. – № 9. – С. 756-763.
49. Перспективы создания нового поколения льдоаккумуляторов для систем с неравномерной тепловой нагрузкой / Г. Ю. Гончарова [и др.]// Холодильная техника. – 2022. – № 2. – С. 105-114.
50. Исследование процессов тепломассообмена при пленочном обтекании ледовых поверхностей с фазовым переходом на границе раздела / Г. Ю. Гончарова [и др.] // Вестник Международной академии холода. – 2021. – № 4. – С. 3-11.
51. Борщев, Г. В. Исследование процессов тепломассообмена в пленочном коаксиальном льдоаккумуляторе башенного типа / Г. В. Борщев, С. С. Борзов // Международная научно-практическая конференция молодых учёных и специалистов отделения сельскохозяйственных наук Российской академии наук. – 2022. – № 1. – С. 76-80.
52. Гончарова, Г. Ю. Перспективы использования плёночного обтекания для создания теплообменного оборудования нового поколения / Г. Ю. Гончарова, С. С. Борзов, Г. В. Борщев // Инновационные технологии обработки и хранения сельскохозяйственного сырья и пищевых продуктов : Сборник научных трудов ученых и специалистов к 90-летию ВНИХИ. – Москва : Общество с ограниченной ответственностью "Амирит", 2020. – С. 72-80.

53. Семилет, З.В. Оросительные теплообменники химических производств / З.В. Семилет. – Киев: Машгиз, 1961.–112 с.
54. Воронцов, Е. Г. Теплообмен в жидкостных пленках./ Е.Г. Воронцов, Ю.М. Тананайко.–Киев: Техника, 1972.–196 с.
55. Nusselt, W. Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes / W. Nusselt // Zeitschrift des VDI. – 1916. – Bd. 60. – № 27. – S. 541–546, 568–575.
56. Зайнуллина Э.Р. Градиентная теплотметрия и исследование теплообмена при конденсации пара на наружной поверхности трубы: дис. ...канд. техн. наук: 01.04.14/Зайнуллина Эльза Рафисовна. – Санкт-Петербург., 2019. – 117 с.
57. Шарыпов, О. В. К вопросу о структуре неизотермических пленочных течений / О. В. Шарыпов, К. А. Медведко // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. – 2006. – Т. 1. – № 2. – С. 48-53.
58. Hani, H.S. Experimental Investigation on Freezing of Water Falling Film on Vertical Bank of Cold Horizontal Tube./ H. S. Hani, A. Hussain, M. A. Selim // Journal of Thermal Science and Engineering Applications.- 2012. -Vol. 4. –№ 4. –P. 041006
59. Капица, П.Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости / П. Л. Капица, С. П. Капица // Журнал экспериментальной и теоретической физики. - 1949. - Т. 19. – № 2. – С. 105-120.
60. Кутателадзе, С.С. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах/ С.С. Кутателадзе, В.Е. Накоряков // Новосибирск : Наука СО. - 1984. -301 с.
61. Левич, В.Г. Физико-химическая гидродинамика/ В.Г Левич. — М.: Издательство АН СССР, 1952. — 538 с.
62. Лабунцов, Д. А. Обобщение теории конденсации Нуссельта на условия пространственно-неравномерного поля температур теплообменной поверхности / Д. А.Лабунцов // Теплообмен и гидравлическое сопротивление, «Труды МЭИ». – 1965.–№. 63.– С. 79–84.

63. Теплообмен и кризисные явления при интенсивном испарении в стекающих волновых пленках жидкости / [Павленко А.Н. и др.] // Теплофизика и аэромеханика. -2006. -Т. 13, -№ 1. -С. 93–105.
64. Павленко, А.Н. Переходные процессы в стекающих пленках жидкости/А.Н. Павленко, А.С. Суртаев, А.М. Мацех // Теплофизика высоких температур. -2007. - Т. 45, -№ 6. -С. 905–916.
65. Pavlenko, A.N. Breakdown of a falling wave liquid film during nonstationary heat release/ A.N. Pavlenko, A.S. Surtaev, A.N. Chernyavskii // J. Heat Transfer Research. - 2008.- Vol. 39,- No. 6. -P. 509–517.
66. Development of heat transfer and crisis phenomena in falling wavy liquids films at nonstationary heat release/ A.N. Pavlenko [et al.] // Proc. of 5-th Int. Conf. on Transport Phenomena in Multiphase Systems "Heat 2008", Bialystok, Poland. –2008. –Vol. 2. –P. 131–138.
67. Капица, П. Л. Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // Журнал экспериментальной и теоретической физики.-1948. –Т. 18. –№1. –С. 3–28
68. Семенов, Н.П. Течение жидкости в тонких слоях //Журнал технической физики. – 1944. – Т. 14. – №. 7-8. – С. 427-437.
69. Шкадов, В. Я. Течения вязкой жидкости: учебное пособие для университетов /В.Я. Шкадов, З.Д. Запрянов — М.: Изд-во МГУ, 1984. – 200 с.
70. Холпанов, Л. П. Гидродинамика и теплообмен с поверхностью раздела/ Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов — М.: Наука, 1990. – 271 с.
71. Шкадов В. Я. К теории волновых течений тонкого слоя вязкой жидкости/ В. Я. Шкадов // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1968. – №. 2. – С. 20-25.

72. Ахметов, В. К. Численное моделирование вязких вихревых течений для технических приложений./ В. К.Ахметов, В. Я. Шкадов// М.: Изд-во АСВ, 2009.– 176 с.
73. Experimental study on the distribution of local heat transfer coefficient of falling film heat transfer outside horizontal tube / S. Liu [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2021. – Vol. 170. – P. 121031.
74. Papini D. Modelling of Heat transfer Phenomena for Vertical and Horizontal Configurations of in-Pool Condensers and Comparison with Experimental Findings / D. Papini, A. Cammi // Science and Technology of Nuclear installation .- 2010.-Vol. 2010. -P. 815754.
75. Кутателадзе, С.С. Справочник по теплопередаче/ С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский.– М.:Госэнергоиздат, 1958.– 414 с.
76. Хоблер, Т. Теплопередача и теплообменники/ Т. Хоблер под ред. М.И. Курочкиной [перевод с польского].– Л.: Госхимиздат, 1961. – 820 с.
77. Рекомендации по использованию мероприятий по экономии охлаждающей воды на предприятиях молочной промышленности и систем охлаждения на базе льдохранилищ. М.: ВНИПТИХОЛОДПРОМ, 1987.
78. Konov, D. S. Numerical solution of the Stefan problem for an artificial ice island / D. S. Konov, M. V. Muratov, V. A. Biryukov // Russian journal of cybernetics. – 2022. – Т. 3. – №. 1. – С. 14-19.
79. Boureghda, A. Solution to an ice melting cylindrical problem / A. Boureghda // Journal of Nonlinear Sciences and Applications/ – 2016. – Vol. 9. – P. 1440-1452.
80. Калиева, К. А. О математической модели однофазной задачи Стефана / К.А. Калиева // Проблемы информатики. -2013.-Т.19. –№2. –С. 13 - 21

81. Апушкинская, Д. Е. Алгоритм численного решения задачи Стефана и его применение к расчетам температуры вольфрама при импульсном воздействии / Д. Е. Апушкинская, Г. Г. Лазарева // СМФН. – 2021. – Т. 67. – №. 3. – С. 442-454.
82. Применение различных моделей турбулентности для расчета несжимаемых внутренних течений/ Баранов П. А. [и др.] //Ученые записки ЦАГИ. – 2017. – Т. 48. – №. 1. – С. 26-36.
83. Harrison K.L. Comparison of RANS Turbulence Models for Prediction of Film Cooling Performance / K.L. Harrison, D.G Bogard// Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, and Air. Volume 4: Heat Transfer, Parts A and B. – Berlin, 2008. -P. 1187-1196.
84. Shaheed, R. comparison of standard $k-\varepsilon$ and realizable $k-\varepsilon$ turbulence models in curved and confluent channels/ R. Shaheed, A. Mohammadian, G. Kheirkhah// A Environmental Fluid Mechanics. – 2019. – Vol. 19. – P. 543-568.
85. Kadivar, M. A comparison of RANS models used for CFD prediction of turbulent flow and heat transfer in rough and smooth channels/ M. Kadivar, D. Tormey, G. McGranaghan // International Journal of Thermofluids. – 2023. – Vol.20. –P. 100399
86. Menter, F.R. Review of the SST Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective // International Journal of Computational Fluid Dynamics. – 2009. – Vol. 23. – №. 4. – P. 305-316.
87. Langtry, R.B. Correlation-Based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes/ R.B. Langtry, F.R. Menter // AIAA Journal. – 2009. – Vol. 47. – №. 12. – P. 2894-2906.
88. Моделирование процесса смешения теплоносителя в опускном участке и напорной камере смешения ВВЭР-1200 (В-491) / Чорный А. Д. [и др.] //Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук. – 2022. – Т. 67. – №. 1. – С. 65-74.

89. Carciofi, B. A. M. Experimental results and modeling of poultry carcass cooling by water immersion/ B. A. M. Carciofi, J. B. Laurindo //Food Science and Technology. – 2010. – Vol. 30. – P. 447-453.
90. Верхивкер, Я. Г. Вода в технологии производства хлебобулочных изделий с отложенной выпечкой / Я. Г. Верхивкер, Е. М. Мирошниченко, О. В. Петькова // Пищевые системы. – 2021. – Т. 4, № 1. – С. 31-39.
91. Корниенко, В. Н. Методика теплотехнического расчета аккумуляторов холода для охлаждающих систем с пиковыми тепловыми нагрузками / В. Н. Корниенко // Научное и техническое обеспечение холодильной промышленности : Сборник научных трудов ученых и специалистов к 80-летию ВНИХИ.– Москва: Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт холодильной промышленности", 2010. – С. 27-37
92. ГОСТ 31449-2013 Молоко коровье сырое. Технические условия. – М:Стандартинформ, 2018.
93. Энциклопедия «Пищевые технологии». Том 16 «Технологии холодильной обработки и хранения пищевой продукции», книга 2.- ООО «ИД «Углич»», 2019.- 298 с.
94. Охлаждение молока на животноводческих фермах: современное состояние и перспективы развития. / Фомин М. Б. [и др.] //Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2021. – №. 1. – С. 134-139.
95. Борисов, В. И. Современные технологии и оборудование для охлаждения молока на животноводческих фермах и комплексах / В. И. Борисов, Н. В. Борисова , В. О. Зайцев //Современные проблемы территориального развития. – 2019. – №. 1. – С. 1-13.
96. Сергеева, Н. В. Эффективность современных технологий мгновенного охлаждения молока / Н. В. Сергеева, Ч. А. Атабаев // Международный технико-экономический журнал. – 2016. – № 6. – С. 65-68.

97. Прудовская, О. А. Современные решения в системах охлаждения молока / О. А. Прудовская, С. М. Семенчук // Молочная промышленность. – 2010. – № 8. – С. 8-9.
98. Алексеенкова, Е. Холод для молока / Е. Алексеенкова // Пищевая индустрия. – 2020. – Т. 44. – № 2. – С. 19-23.
99. Данильченко, А. С. Технологические стадии производства пива на Белореченском пивзаводе / А. С. Данильченко, Т. Г. Короткова // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2020. – № 4. – С. 10-26.
100. Данильченко, А. С. Технологические стадии производства пива на Майкопском пивзаводе / А. С. Данильченко, Т. Г. Короткова // Электронный сетевой политематический журнал "Научные труды КубГТУ". – 2020. – № 4. – С. 27-41.
101. Милош, К. Охлаждение пива на заводах / К. Милош // Пиво и напитки. – 2004. – №. 4. – С. 28-30.
102. Метрология теплофизического эксперимента : учеб. Пособие / С.З. Сапожников [и др.]; под ред. проф. С.З. Сапожникова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. – 108 с.
103. ГОСТ 34100.3-2017 Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. – М:Стандартинформ. 2018.
104. ГОСТ OIML R 76-1-2011 Государственная система обеспечения единства измерений. Весы неавтоматического действия. – М:Стандартинформ. 2013.
105. Малова, Н. Н. Об одном подходе к расчету средней ошибки аппроксимации регрессионных моделей / Н. Н. Малова //Международный технико-экономический журнал. – 2017. – №. 5. – С. 54-57
106. Крамаренко, Н. В. Обзор способов вывода критериев подобия в механике / Н. В. Крамаренко //Вестник Самарского государственного технического

университета. Серия Физико-математические науки. – 2021. – Т. 25. – №. 1. – С. 163-192.

107. Кирпичев, М. В. Теория подобия/ М.В. Кирпичев; под ред. М.А. Михеева. – М.:Академия наук СССР, 1953.– 97 с.

108. Хантли, Г. Анализ размерностей / Г. Хантли; под ред. И.Т. Оладьева и К.Д. Воскресенского [перевод с англ.]. – М.:МИР, 1970.– 176 с.

109. Исаченко, В. П. Теплопередача: учебник для вузов/ В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. –3-е изд. перераб. и доп. – М.:Энергия, 1975. – 488 с.

110. Исследование эффективности применения аккумуляторной системы охлаждения на предприятиях мясной и птицеперерабатывающей промышленности/ Г. А. Белозеров [и др.]// Птица и птицепродукты. – 2022. –№1. – С. 61-64

111. Энергосберегающие аспекты технологии переработки зерна в этиловый спирт / М. В. Туршатов [и др.] // Достижения науки и техники АПК. – 2022. – Т. 36, № 7. – С. 92-96.

112. Семенчук, С. М. Мифы об оборудовании для ледяной воды // Холодильная техника. – 2009. – № 7. – С. 16-18

113. Антипов, А. В. Промышленные аккумуляторы холода / А. В. Антипов, Ц. Б. Дугаров // Молочная промышленность. – 2016. – № 7. – С. 14-16

114. Муращенкова, Н. В. Оценка изменения температуры воздуха на территории Московского региона / Н. В. Муращенкова // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий : сборник научных трудов III Всероссийской научной конференции с международным участием. – Красноярск, 2022. – С. 285-292.

115. Локощенко, М. А. Катастрофическая жара 2010 года в Москве по данным наземных метеорологических измерений / М. А. Локощенко // Известия

Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 48. № 5. – С. 523

116. Гришанов, В. Н. Системы охлаждения лазеров: учеб. пособие / В. Н. Гришанов, Е. А. Изжеуров, Д. А. Угланов ; Федер. агентство по образованию, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева. - Самара : [Изд-во СГАУ], 2006.– 103 с.

117. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений // Под рук. академика ВАСХНИЛ Г.М. Лозы. – М.: Колос, 1980. – 112 с.

118.Коровин, Г.С. Разработка и обоснование водооборотного льдоаккумулятора для молочно-товарных ферм: дис. ...канд. техн. наук: 05.20.01/Коровин Григорий Сергеевич. – Оренбург., 2015. – 128 с.

119. Потребителям с максимальной мощностью менее 670 кВт [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.mosenergosbyt.ru/legals/tariffs-n-prices/less-670kW.php>

ПРИЛОЖЕНИЯ**Приложение 1**

Рисунок П. 1.1 - Изготовление змеевиков из отожжённой медной трубки



Рисунок П. 1.2 - Готовый змеевик из отожжённой медной трубки

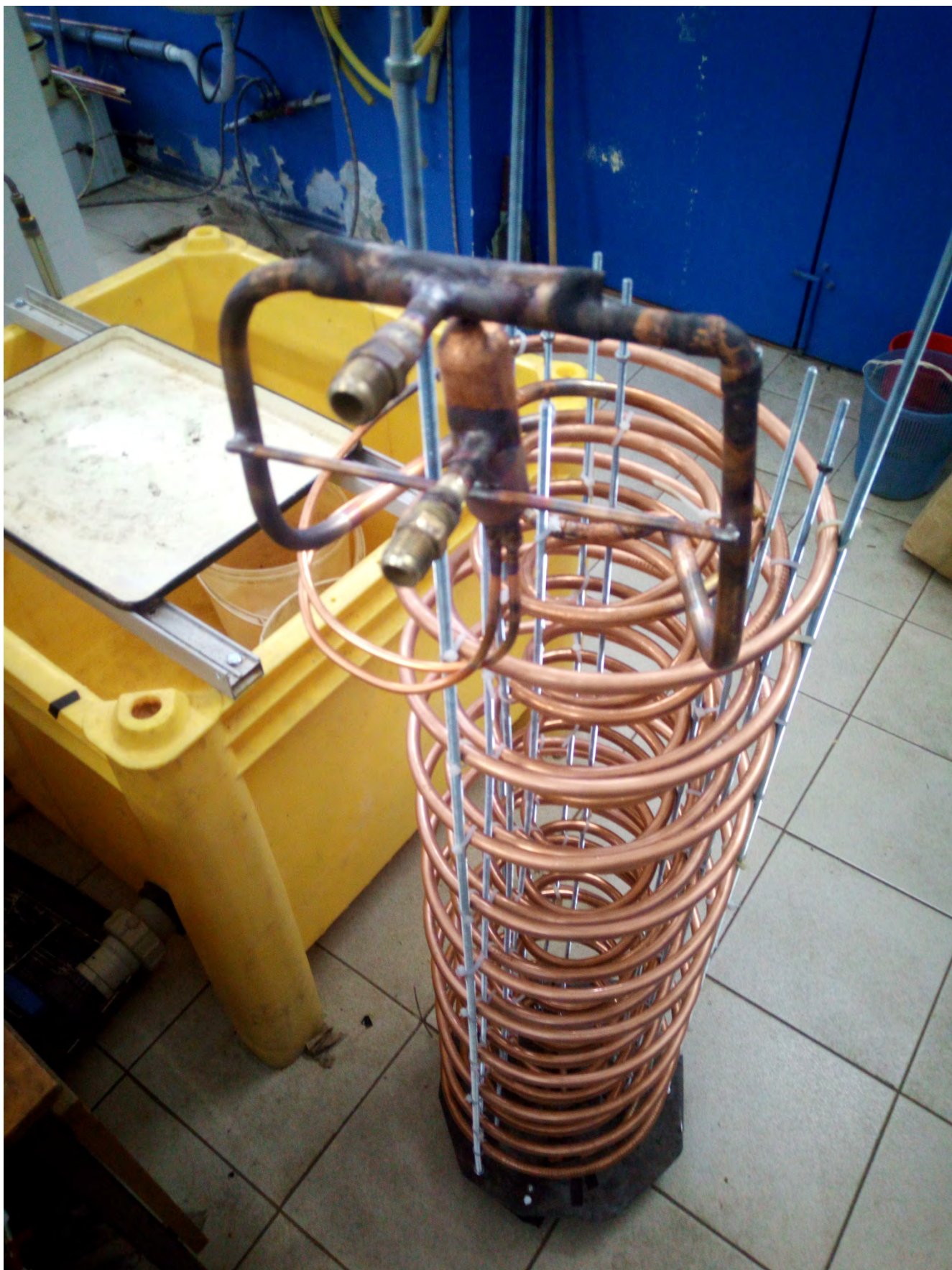


Рисунок П. 1.3 - Макет башенного коаксиального ЛА в сборе



Рисунок П. 1.4 - Льдоаккумулятор с замороженным льдом перед началом испытаний разрядки в пленочном режиме плавления.



Рисунок П. 1.5 - Проведение испытаний по исследованию возможности зарядки ЛА в условиях орошения поверхности при включенной холодильной установке



Рис. П. 1.6 Процесс плавления льда в объёме жидкости (кадр из видеоматериалов)



Рисунок П. 1.7 - Процесс зарядки ЛА

