

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Энергетический

Направление подготовки Физика

Кафедра Теоретической и промышленной теплотехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРЫТОГО ТЕРМОСИФОНА</b>

УДК 621.181.001.4:536.24

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Пономарёв Константин Олегович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Феоктистов Д. В.	К.Т.Н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король И.С.	К.Х.Н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ТПТ	Кузнецов Г.В.	профессор, д.ф.-м.н.		

Томск – 2017 г.

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ООП 03.04.02

### Физика, магистратура

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
Универсальные компетенции	
P1	Самостоятельно обучаться и постоянно повышать квалификацию в процессе своей профессиональной деятельности.
P2	Эффективно работать индивидуально, в качестве члена команды или руководителя группы специалистов всевозможных направлений, проявлять ответственность за результаты работы, осуществлять педагогическую деятельность и вести консультации научным исследователям.
P3	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем разрабатывать документацию, и вести дискуссию по результатам инженерной деятельности.
P4	Проявлять представления о методологических основах научной деятельности, нести ответственность за профессиональную деятельность.
P5	Демонстрировать глубокие знания культурных, этических и социальных аспектов научно-исследовательской деятельности.
Профессиональные компетенции	
P6	Использовать глубокие естественнонаучные, математические и инженерные знания в научно-исследовательской работе.
P7	Принимать участие в фундаментальных исследованиях в области теплоэнергетического производства с постановкой и решением инженерных задач, по созданию и эксплуатации современного теплотехнического оборудования, с использованием применением компьютерных технологий для моделирования и анализа процессов тепломассообмена.
P8	Планировать и разрабатывать технологические процессы, применяя современные информационные технологии и теплотехнические устройства.
P9	Применять отечественный и зарубежный опыт, современные достижения науки в научных исследованиях, осуществлять презентацию результатов.
P10	Использовать средства автоматизированных систем управления производства, соблюдать правила безопасности труда и охраны здоровья, выполнять требования по защите окружающей среды.
P11	Уметь решать нестандартные задачи, интегрируя знания различных научных областей, креативно мыслить и вести педагогическую деятельность.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ

Направление подготовки Теплоэнергетика и теплотехника  
направление – Физика

Кафедра теоретической и промышленной теплотехники

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой ТПТ

\_\_\_\_\_  
(Подпись)      \_\_\_\_\_ (Дата) Кузнецов Г.В.

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации

Студенту:

Группы	ФИО
<b>5ФМ51</b>	<b>Пономарёву Константину Олеговичу</b>

Тема работы:

<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРЫТОГО ТЕРМОСИФОНА</b>	
Утверждена приказом ректора (номер, дата)	№235/с от 27.01.17 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

	30.05.2017 г.
--	---------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Объект исследования – процессы теплообмена в вертикальном закрытом двухфазном термосифоне. Предмет исследования – влияние степени заполнения и подведенной плотности теплового потока на эффективность работы термосифона.
---------------------------------	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b></p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Анализ показателей, характеризующих работу закрытого двухфазного термосифона. Определение признаков условного выделения частей в термосифоне и установление причин возникновения в них флуктуаций температур и давления. Определение коэффициента теплоотдачи от поверхности к теплоносителю.</p> <p>Сборка и пуско-наладка экспериментальной установки. Выбор способа и средства регистрации, метода проведения эксперимента, области изменения основных факторов и точность их измерения.</p> <p>Расчет минимальной степени заполнения. Определение влияния последней и подведенной плотности теплового потока на эффективность работы термосифона.</p>
--	--

<p><b>Перечень графического материала</b> <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Презентация (20 слайдов)</p>
---	---------------------------------

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**  
*(с указанием разделов)*

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Кузьмина Наталия Геннадьевна
Социальная ответственность	Король Ирина Степановна
Раздел ВКР на иностранном языке	Тарасова Екатерина Сергеевна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Investigation of fluctuations of temperature and pressure in a two-phase closed thermosiphon

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Феоктистов Д.В.	к. т. н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Пономарёв К.О.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5ФМ51	Пономарёву Константину Олеговичу

<b>Институт</b>	<b>Энергетический</b>	<b>Кафедра</b>	<b>Теоретической и промышленной теплотехники</b>
<b>Уровень образования</b>	магистратура	<b>Направление/специальность</b>	03.04.02 Физика. Производство, транспорт и хранение сжиженного природного газа.

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	Стоимость ресурсов принять согласно рыночной цене.
2. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Принять к расчету стандартную систему налогообложения. Ставки налогов и отчислений принять в соответствии с действующем законодательством.

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого и инновационного потенциала НИИ</i>	Определение потенциала исследования.
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	Определение затрат на проведение экспериментального исследования, планирование затрат времени и ресурсов, планирование бюджета проекта.
3. <i>Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности</i>	Определение возможных отраслей применения результатов исследования.

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

--

**Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**

--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Ст. преподаватель	Кузьмина Н.Г.			

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
5ФМ51	Пономарёв К.О.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа 5ФМ51	ФИО Пономарёву Константину Олеговичу
-----------------	---

Институт	Энергетический	Кафедра	Теоретической и промышленной теплотехники
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	03.04.02 Физика. Производство, транспорт и хранение сжиженного природного газа.

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (устройство, методика, рабочее место) и области его применения

**Тема работы:** Экспериментальное исследование режимов работы двухфазного закрытого термосифона.

**Объект исследования:** Двухфазный закрытый медный термосифон, заполненный дистиллированной водой.

Экспериментальная установка состоит из термосифона, к торцу которого подводится теплота от плоского силиконового нагревателя, подключенного к лабораторному автотрансформатору. С помощью программы Virtual Instrument, разработанной в среде LabView, происходит регистрация значений температур и давления, зафиксированных с помощью термопар и датчика давления.

**Методика:** Определение влияния степени заполнения и плотности теплового потока на теплопередающие характеристики термосифона.

**Рабочее место** находится в лаборатории тепломассопереноса и гидродинамики пленочных и ривулентных течений в теплообменниках ТПУ.

**Области применения:** В нефтехимической и газовой промышленности двухфазные термосифоны применяются в качестве термостабилизаторов основания грунта сооружений (зданий, резервуаров), железных дорог, газопроводов. Также системы охлаждения (отвода теплоты) на основе двухфазных термосифонов применяются при регулировании теплового режима энергонасыщенного оборудования в различных отраслях промышленности (установки осушки и очистки природного газа, элементы металлургических печей, лопатки газовых турбин, трансформаторы, устройства и приборы электронной техники, агрегаты для термической обработки термолабильных продуктов и т.п.).

<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<p><b>1. Производственная безопасность</b></p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой;</li> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты;</li> <li>– (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства).</li> </ul> <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– механические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– термические опасности (источники, средства защиты);</li> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты);</li> </ul> <p>пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</p>	<p>При анализе вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения выявлены: освещенность 533 лк, напряженность электромагнитного поля находится в диапазоне 550–880 В/м.</p> <p>При анализе опасных факторов выявлены факторы термического характера: (высокие температуры нагревательного участка установки с термосифоном – не выше 200 °С) и электрической природы (провода от лабораторного автотрансформатора, напряжение питания которого 220 В.).</p> <p>Представлены средства коллективной и индивидуальной защиты (СКЗ и СИЗ).</p> <p>СКЗ: обеспечение недоступности нагретых поверхностей; теплоизоляция источника теплоты; изоляция проводов и различных элементов, проводящих ток; использование предупредительных плакатов и знаков безопасности; установка предупреждающих ограждений, блокировок и сигнализаций; применение небольших напряжений; зануление и защитное заземление; автоматическое защитное отключение.</p> <p>СИЗ: инструменты с изолированными рукоятками; изолирующие подставки; резиновые коврики; защитные и диэлектрические перчатки.</p>
<p><b>2. Экологическая безопасность:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– защита селитебной зоны</li> <li>– анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы);</li> <li>– анализ воздействия объекта на литосферу (отходы);</li> </ul> <p>разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды.</p>	<p>При анализе экологической безопасности выявлено возможное воздействие объекта на литосферу (утилизации люминесцентных ламп, отходы).</p> <p>Вредные воздействия объекта на атмосферу отсутствуют.</p> <p>Вредные воздействия объекта на гидросферу отсутствуют.</p>
<p><b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;</li> <li>– выбор наиболее типичной ЧС;</li> <li>– разработка превентивных мер по предупреждению ЧС;</li> </ul> <p>разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий.</p>	<p>Чрезвычайной ситуацией (ЧС) в лаборатории является пожар.</p> <p>При возникновении ЧС покинуть помещение лаборатории согласно плану эвакуации.</p> <p>Первичное средство пожаротушения – порошковый огнетушитель ОП-5.</p>
<p><b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> </ul> <p>организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>	<p>Основные положения по охране труда изложены в Конституции РФ, Кодексах законов о труде РФ, основных законодательствах РФ.</p> <p>Компоновка рабочей зоны проведена согласно журналу инструктажа по охране труда на рабочем месте.</p>

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Король И.С.	К.Х.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ФМ51	Пономарёв К.О.		



## РЕФЕРАТ

Магистерская диссертация 134 с, 22 рисунка, 17 таблиц, 73 источника, 4 приложения.

Ключевые слова: закрытый двухфазный термосифон, степень заполнения, плотность теплового потока, эффективность, термическое сопротивление, перепад температур, коэффициент теплоотдачи, испарение, кипение, флуктуации.

Объект исследования – процессы тепломассообмена в вертикальном закрытом двухфазном термосифоне.

Предмет исследования – влияние степени заполнения и подведенной плотности теплового потока на эффективность работы термосифона.

В результате экспериментального исследования определено влияние подведенной плотности теплового потока и степени заполнения испарительной части термосифона на его теплопередающие характеристики. Получены зависимости термического сопротивления, перепада температур по высоте парового канала и коэффициента теплоотдачи от плотности теплового потока для различных объемов заполнения теплоносителем.

Результаты экспериментального исследования режимов работы закрытого двухфазного термосифона создают предпосылки для разработки теоретических положений конструирования энергоэффективного теплоотводящего оборудования.

# ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ, НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

## Определения

В настоящей работе применяются следующие термины с соответствующими определениями:

**Испарение** – процесс фазового перехода из жидкости в газ (пар) со свободной поверхности.

**Кипение** – процесс образования в жидкой фазе новых поверхностей раздела “газ-жидкость” при температуре насыщения и выше.

**Конденсация** – процесс фазового перехода из газа (пара) в жидкость.

**Тепловой поток** – вектор, противоположно направленный температурному градиенту и равный по абсолютной величине количеству теплоты, проходящему за единицу времени через изотермическую поверхность.

**Плотность теплового потока** – тепловой поток, отнесенный к площади расчетной поверхности.

**Температурный напор** – разница температур поверхности и окружающей её среды, между которыми происходит теплообмен.

**Перепад температур** – разность уровней температур тела, среды или потока.

**Коэффициент теплоотдачи** – коэффициент пропорциональности в законе Ньютона-Рихмана, характеризующий интенсивность теплообмена между поверхностью и средой, численно равный отношению плотности теплового потока к температурному напору.

**Термическое сопротивление** – способность среды препятствовать тепловому движению молекул.

**Степень заполнения** – отношение объемов теплоносителя к термосифону или его испарительной части.

**Флуктуации** – случайные отклонения (периодические колебания) физических величин от их средних значений.

**Случайная погрешность измерений** – погрешность, величина которой в серии экспериментов изменяется случайным образом, характеризуемая отклонением измерений одной и той же величины в одинаковых условиях в любую сторону (уменьшения или увеличения).

**Систематическая погрешность измерений** – погрешность, величина которой в серии экспериментов остается неизменной, характеризуемая отклонением измерений одной и той же величины в одинаковых условиях в одну сторону (уменьшения или увеличения).

### Обозначения и сокращения

$\varepsilon$  и  $\varepsilon_u$  – степень заполнения, равная отношению объема жидкой фазы теплоносителя при начальных условиях к внутреннему объему термосифона и к объему испарителя соответственно;

$q_F$  и  $q_S$  – плотность теплового потока, отнесенная к площади поверхности теплоподвода и к площади поперечного сечения испарителя соответственно,  $Вт / м^2$ ;

$q_{кр}$  – критическая плотность теплового потока,  $Вт / м^2$ ;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $Вт / (м^2 \cdot К)$ ;

$t_c$  – температура стенки,  $^{\circ}С$ ;

$t_s$  – температура насыщения,  $^{\circ}С$ ;

$\Delta t = (t_c - t_s)$  – температурный напор,  $^{\circ}С$ ;

$R$  – термическое сопротивление,  $(м^2 \cdot К) / Вт$ ;

ЗДТ – закрытый двухфазный термосифон;

ТС – термическое сопротивление;

СПГ – сжиженный природный газ;

VI – Virtual Instrument;

NI – National Instrument;

## Нормативные ссылки

В настоящей работе использованы ссылки на следующие стандарты:

1. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий.
2. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение.
3. ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ. Электрические поля промышленной частоты. Допустимые уровни напряженности и требования к проведению контроля на рабочих местах.
4. Инструкция №14.22-27 по оказанию первой помощи при несчастных случаях.
5. Инструкция №14.22-28 по охране труда при выполнении работ с использованием видеодисплейных терминалов и персональных электронно-вычислительных машин при охране труда при работе на персональном компьютере.
6. Инструкция №14.22-29 по охране труда при выполнении работ с использованием комплекса измерения локальных характеристик процессов при испарении слоя жидкости, обдуваемого потоком газа.
7. Инструкция №14.22-30 по охране труда при выполнении работ с использованием комплекса измерения характеристик гидродинамических и теплофизических процессов в условиях интенсивного нагрева капель.
8. ГОСТ 17.4.1.02-83. Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения.
9. РД 34.49.503-94. Типовая инструкция по содержанию и применению первичных средств пожаротушения на объектах энергетической отрасли.
10. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.

## Оглавление

Введение.....	15
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАКРЫТОМ ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОНЕ .....	17
1.1 Показатели (комплексы), характеризующие работу закрытого двухфазного термосифона .....	17
1.2 Условное разделение термосифона на части .....	24
1.3 Флуктуации температуры и давления в термосифоне .....	25
1.4 Определение коэффициента теплоотдачи от нагретой поверхности теплоносителю в закрытых двухфазных термосифонах.....	29
1.4.1 Теплообмен при конвекции .....	30
1.4.2 Теплообмен при кипении.....	34
Выводы по первой главе.....	41
2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРЫТОГО ТЕРМОСИФОНА.....	43
2.1 Экспериментальная установка.....	43
2.2 Сборка и пуско-наладка экспериментальной установки .....	46
2.3 Программное обеспечение .....	51
2.4 Методика проведения экспериментального исследования .....	53
2.5 Выбор области изменения основных факторов .....	56
2.6 Погрешность определения факторов .....	58
2.7 Выбор плана проведения экспериментальных исследований.....	59
Выводы по второй главе.....	61
3 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ..	62
3.1 Разделение термосифона на части .....	62
3.2 Критическая плотность теплового потока .....	64

3.3 Степень заполнения .....	71
3.4 Флуктуации температуры в термосифоне .....	75
3.5 Эффективность работы термосифона .....	78
4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	81
4.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения.....	81
4.2 Смета затрат на экспериментальное исследование .....	82
4.3 Комплексный анализ научно-исследовательского проекта .....	87
5 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ.....	88
5.1 Производственная безопасность .....	89
5.1.1 Анализ вредных факторов производственной среды.....	89
5.1.2 Анализ опасных факторов производственной среды.....	92
5.2 Экологическая безопасность.....	95
5.3 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	95
5.4 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	97
5.5 Выводы по разделу социальная ответственность.....	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	99
Список публикаций.....	101
Список используемой литературы .....	103
Приложение А .....	111
Приложение Б .....	127
Приложение В.....	129
Приложение Г .....	132

## ВВЕДЕНИЕ

В нефтяной, химической, газовой, металлургической, электронной и атомной промышленности разработка эффективных систем передачи и трансформации тепловой энергии является одной из важнейших задач при проектировании технологического оборудования, решение которой позволит обеспечить тепловую защиту высокотемпературного оборудования, стабилизацию температурного уровня работы агрегатов и машин. Безаварийная работа электронных, энергогенерирующих приборов обеспечивается за счет контроля их температуры в требуемых пределах, обозначенных производителем. Охлаждение теплонагруженных элементов возможно традиционными системами с использованием относительно больших объемов теплоносителя, а также системами на базе двухфазных термосифонов – компактными, ресурсосберегающими устройствами, способными отводить высокие локальные тепловыделения.

Двухфазные термосифоны широкого применения в промышленности не получили из-за отсутствия научных основ их проектирования и конструирования. В последнее десятилетие с развитием энергоемких технологий начались, разработки и внедрение данных устройств, характеризующихся автономностью, простотой в изготовлении, надежностью в эксплуатации и отсутствием перекачивающих средств при высокой интенсивности внутренних процессов теплопереноса и максимальной теплопередающей способности, в качестве высокоэффективных регуляторов теплового режима теплотехнических устройств.

Двухфазные термосифоны используют в качестве термостабилизаторов основания грунта сооружений (зданий, резервуаров), железных дорог, газопроводов. Системы охлаждения (отвода теплоты) на основе двухфазных термосифонов применяются при регулировании теплового режима энергонасыщенного оборудования: осушки и очистки природного газа, элементов металлургических печей, трансформаторов приборов электронной

техники, агрегатов термической обработки термолабильных продуктов, ядерных реакторов.

В настоящее время развивается индустрия сжиженного природного газа (СПГ). В конце 2017 года планируется запуск первой линии "Ямал СПГ". К 2019 году завод предусматривает выход на полную мощность (16,5 млн. т. в год), что повысит долю России на мировом рынке СПГ на 8–9%. В процессе производства СПГ природный газ поступает на технологическую линию абсорбционной очистки и осушки. Используемые абсорбенты (моноэтаноламин, диэтиленгликоль) "чувствительны" к высоким температурам. В результате локального перегрева возможно их интенсивное разложение. Применение двухфазных закрытых термосифонов в трубчатых нагревательных печах и огневых подогревателях абсорбента в аппаратах осушки и очистки природного газа, позволит повысить энергоэффективность последних.

Разработка и создание эффективных систем передачи теплоты на базе ЗДТ сдерживается отсутствием научных основ, позволяющих прогнозировать эффективный режим их работы. Неизвестны механизмы совместно протекающих процессов конвекции, кондукции и фазовых превращений в ЗДТ.

Цель работы – экспериментальное исследование влияния степени заполнения и плотности теплового потока на теплопередающие характеристики термосифона.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Сборка и настройка экспериментальной установки.
2. Выполнение серии экспериментов с целью определения области варьирования факторов.
3. Экспериментальное определение влияния на эффективность работы термосифона плотности теплового потока, степени заполнения.



# 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАКРЫТОМ ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОН

## 1.1 Показатели (комплексы), характеризующие работу закрытого двухфазного термосифона

Оценка эффективности работы закрытого двухфазного термосифона возможна по показателям, выбор которых исследователями принимается в соответствии с экспериментальной или математической моделью.

Исследовалось [1] влияние геометрических параметров испарительной части кольцевого термосифона, заполненного 20 мл дегазированной жидкостью HFE  $C_3F_7OCH_3$  на эффективность его работы. Оценка проведена по термическому сопротивлению  $R$  теплоотводящей жидкости и эффективному коэффициенту теплоотдачи  $\alpha_{eff}$ :

$$R = \frac{T_s - T_{sat}}{Q},$$
$$\alpha_{eff} = \frac{Q}{F \cdot (T_s - T_{sat})},$$

где  $T_s$  – температура стенки,  $^{\circ}C$ ;  $T_{sat}$  – температура насыщения жидкости,  $^{\circ}C$ ;  $Q$  – мощность, подводимая к дну испарителя, Вт;  $F$  – площадь испарительной части,  $m^2$ .

$T_s$  измерена с помощью 40-миллиметровой термопары, установленной в канавке 1 мм на дне испарителя.  $T_{sat}$  регистрировали термопарой, погруженной в жидкость непосредственно над поверхностью кипения, но не касаясь ее. В конденсаторе, охлаждаемом жидкостью, поддерживалось атмосферное давление. Абсолютное давление насыщения изменялось от 76 до 109 кПа. Мощность нагрева увеличивалась с 50 Вт до 300 Вт с шагом 10 Вт. Эксперимент прекращался при условии появления сухого пятна. Определено, что при использовании плоских нагревателей (100 и 400  $mm^2$ ) удельные тепловые потоки составляли 750000 и 450000  $Вт/m^2$ . В условиях

эксплуатации нагревателя  $1369 \text{ мм}^2$  тепловой поток квазипостоянен и не превышает  $200000 \text{ Вт} / \text{м}^2$ .

Игольчато-ребристые нагревательные пластины тех же размеров проявляли худшие характеристики при низкой мощности. Из-за отсутствия признаков высыхания термическое сопротивление с ростом теплового потока не возрастало.

Установлено, что с уменьшением размеров нагревательной пластины коэффициент теплоотдачи  $\alpha_{eff}$  от стенки к жидкости увеличивается. Также  $\alpha_{eff}$  возрастает с ростом теплового потока ( $400 \text{ мм}^2 - \alpha_{eff} \approx 6000 \div 20000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ,  $1369 \text{ мм}^2 - \alpha_{eff} \approx 10000 \div 65000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ), для пластин  $100 \text{ мм}^2$  зарегистрирован пик  $\alpha_{eff} \approx 145000 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , после которого  $\alpha_{eff}$  уменьшается.

Исследовано [2] влияние рабочей жидкости и структуры ребра на теплопередающие характеристики петлеобразного термосифонного теплообменника. Эффективность теплопереноса последнего оценивалась по коэффициенту теплоотдачи и плотности теплового потока (количеству отведенной теплоты на единицу поверхности) в конденсаторе. В конденсационной секции использовалось естественное воздушное конвекционное охлаждение. Термосифонный радиатор состоял из пяти независимых контурных термосифонов. Трубы радиусом  $12 \text{ мм}$  с ребрами толщиной  $1 \text{ мм}$ , высотой  $20 \text{ мм}$  с шагом между ними  $5 \text{ мм}$  выполнены из углеродистой стали.

Определено [2], что при использовании ацетона в качестве рабочей среды коэффициент теплоотдачи будет выше, чем у воды и этанола. Теплота, отведенная термосифоном, заполненным ацетоном составила  $199,5 \text{ Вт}$ , что в  $1,97$  раза больше, чем заполненным этанолом и в  $5,49$  раза больше заполненным водой. Установлено, что с ростом высоты ребер и уменьшением расстояния между ними плотность теплового потока и коэффициент теплоотдачи увеличиваются.

Экспериментально исследовалось [3] влияние безразмерных параметров (число Бонда  $Bo$ , Прандтля  $Pr$ , Вебера  $We$ , Фруда  $Fr$ , Якоба  $Ja$ , Кутателадзе  $Ku$ , отношение плотностей пара и жидкости  $\rho_v/\rho_l$ , отношение внутреннего диаметра секции испарителя к внутреннему диаметру зоны возврата жидкости  $d_e/d_r$ ) на теплопередающие характеристики миниатюрного петлевого термосифона.

Обнаружено [3], что изменение  $Bo$ ,  $Pr$ ,  $Ja$ ,  $Ku$ ,  $\rho_v/\rho_l$  и  $d_e/d_r$  не влияет на характеристики теплообмена. С ростом  $We$ ,  $Fr$  и  $Ku$  увеличивается плотность теплового потока. Разработано модифицированное число Кутателадзе, характеризующее эффективность работы термосифона. Оно может использоваться для прогнозирования теплового потока вертикального термосифона:

$$Ku^* = 0,554 \cdot \left( Bo^{1,91} \cdot Fr^{1,28} \cdot Ja^{1,22} \cdot Pr^{1,2} \cdot \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{1,05} \cdot We^{0,28} \cdot \left( \frac{d_e}{d_r} \right)^{0,8} \right)^{0,412},$$

где  $Bo$ ,  $Fr$ ,  $Ja$ ,  $Pr$ ,  $We$  – числа Бонда, Фруда, Якоба, Прандтля, Вебера соответственно;  $\rho_v$  – плотность пара,  $кг / м^3$ ;  $\rho_l$  – плотность жидкости,  $кг / м^3$ ;  $d_e$  – внутренний диаметр испарителя,  $м$ ;  $d_r$  – внутренний диаметр конденсационной трубки,  $м$ .

Чем выше число  $Ku^*$ , тем больше плотность теплового потока. Недостаток этого метода – большая погрешность. Коэффициент достоверности аппроксимации ( $R^2$ ) этого уравнения составлял 0,89. Стандартное отклонение экспериментального теплового потока и прогнозируемого с использованием этого уравнения составляло 30%.

Определена [4] эффективность работы термосифона по наименьшему термическому сопротивлению при максимальном передаваемом тепловом потоке:

$$R = \frac{T_h - T_e}{Q},$$

где  $T_h$  – температура нагревательного элемента,  $^{\circ}C$ ;  $T_e$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}C$ ;  $Q$  – максимальная мощность,  $Вт$ .

Установлено [4], что термическое сопротивление минимально при заполнении испарительной части термосифона на 30%. При большем заполнении максимальный тепловой поток увеличивается. Уменьшается расстояние, прошедшее конденсатом по зоне подвода теплоты, и жидкость полностью возвращается в испаритель. Её уровень не снижается и вероятность кризиса тепломассопереноса уменьшается.

Установлено [5], что с увеличением плотности теплового потока и уменьшением массового потока термическое сопротивление возрастает.

Исследовалась [6] эффективность работы двухфазного закрытого термосифонного солнечного коллектора, заполненного водой. Эксперименты проводились с 8:00 до 18:00 при различных скоростях потока охлаждающей воды. Коэффициент полезного действия термосифона рассчитывался с погрешностью 5% по формуле:

$$\eta = \frac{m \cdot C \cdot (T_o - T_i)}{I \cdot A},$$

где  $m$  – массовый расход охлаждающей воды,  $кг/с$ ;  $C$  – удельная теплоемкость воды,  $Дж/(кг \cdot K)$ ;  $T_o$  – температура охлаждающей воды на выходе,  $^{\circ}C$ ;  $T_i$  – температура охлаждающей воды на входе,  $^{\circ}C$ ;  $I$  – интенсивность солнечного излучения на наклонной поверхности коллектора,  $Вт/м^2$ ;  $A$  – эффективная площадь коллектора,  $м^2$ .

Максимальный КПД (0,65) зарегистрирован в полдень при расходе охлаждаемой воды 0,0125  $кг/с$ .

Исследовано [7] влияние степени заполнения и теплового потока на эффективность работы ЗДТ. Эффективность определялась, как отношение тепла, поглощаемого секцией конденсатора, к энергии, подаваемой в секцию испарения:

$$\eta = \frac{Q_{out}}{Q_{in}} \cdot 100,$$

где  $Q_{in}$  – подведенное количество тепла,  $Bm$ ;  $Q_{out}$  – количество тепла, поглощаемого охлаждающей водой в секции конденсатора,  $Bm$ :

$$Q_{out} = \rho \cdot G_V \cdot c_p \cdot (T_o - T_i),$$

где  $\rho$  – плотность,  $кг / м^3$ ;  $G_V$  – объемный расход,  $м^3 / с$ ;  $c_p$  – теплоемкость охлаждающей воды,  $Дж / (кг \cdot К)$ ;  $T_o$  – температура охлаждающей воды на выходе,  $^{\circ}C$ ;  $T_i$  – температура охлаждающей воды на входе,  $^{\circ}C$ .

При малых тепловых потоках эффективность термосифона низкая. Это связано с тем, что в секции конденсации имеются значительные сухие площади, скорость теплопередачи свободным конвекционным механизмом меньше, чем механизмом конденсации. С ростом подводимой тепловой мощности производительность термосифона вначале возрастала, потом уменьшалась. Максимальная эффективность работы ЗДТ наблюдалась при  $Q_{in} = 500 Bm$ .

Определено [7], что с ростом коэффициента заполнения с 30% до 50% производительность термосифона увеличивается, с 50% до 80% уменьшается. Это объясняется тем, что в нижней части испарителя образующиеся “толстые” слои пара прилипают к стенке, создавая значительное термическое сопротивление, уменьшающее общий коэффициент теплопередачи. По длине испарителя слои паров уменьшались, вблизи свободной поверхности жидкости пузырьки перемещались к оси термосифона. Таким образом, увеличение коэффициента заполнения имеет два противоположных эффекта, влияющих на скорость испарения: 1) Увеличивается теплоотвод от поверхности нагрева, за счет увеличения площади контакта жидкости со стенкой испарительной части термосифона. Увеличивается скорость испарения и теплопередающие характеристики термосифона. 2) Уменьшается скорость образования пузырьков пара. Необходим больший подвод теплоты, чтобы жидкость закипела.

Известно [7], что различие результатов экспериментальных исследований и математического моделирования объясняется тем, что в экспериментах в адиабатной и испарительной частях термосифона тепло теряется, при моделировании это игнорируется. Эффективность термосифона может быть определена с учетом потерь [8]:

$$R = \frac{T_e - T_c}{Q_{in}},$$

где  $T_e$  и  $T_c$  – средние температуры стенок испарителя и конденсатора соответственно,  $^{\circ}C$ ;  $Q_{in}$  – подведенное количество теплоты,  $Bm$ :

$$Q_{in} = V \cdot I - Q_{loss},$$

где  $V$  – напряжение,  $B$ ;  $I$  – ток,  $A$ ;  $Q_{loss}$  – тепловые потери через изолированную стенку испарителя,  $Bm$ . Последний параметр рассчитывался по закону охлаждения Ньютона:

$$Q_{loss} = \bar{\alpha} \cdot F_e \cdot (T_i - T_a),$$

где  $F_e$  – площадь изолированной поверхности испарителя,  $m^2$ ;  $T_i$  – температура изоляции испарительной части термосифона,  $^{\circ}C$ ;  $T_a$  – температура окружающей среды,  $^{\circ}C$ ;  $\bar{\alpha}$  – коэффициент теплоотдачи,  $Bm / (m^2 \cdot K)$ :

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu}_L}{L_i} \lambda_a,$$

где  $L_i$  – высота изоляции испарителя,  $m$ ;  $\lambda_a$  – теплопроводность окружающего воздуха,  $Bm / (m \cdot K)$ ;  $\overline{Nu}_L$  – число Нуссельта, рассчитанное для вертикальной пластины по уравнению Черчилля и Чу [9]:

1) при  $Ra_L < 10^9$

$$\overline{Nu}_L = 0,68 + \frac{0,67 \cdot Ra_L^{1/4}}{\left(1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right)^{4/9}},$$

2)  $0,1 < Ra_L < 10^{12}$

$$\overline{Nu}_L = \left( 0,825 + \frac{0,387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right)^2,$$

где  $Ra_L$  и  $Pr$  – числа Ралея и Прандтля.

Обычно в расчетах применяют второе уравнение в связи с широким диапазоном чисел Ралея (от 0,1 до  $10^{12}$ ) и Прандтля (от 0,004 до 100).

Установлено [8], что при заполнении испарительной части на 60% эффективность работы ЗДТ максимальна. Производительность снижалась для коэффициентов заполнения ниже и выше 60%.

При малом подводимом к испарителю тепловом потоке образуется меньше пара, температура конденсатора мала, испарителя высокая. При увеличении подаваемой мощности образуется больше пара, транспортируемого в конденсатор. Температура последнего увеличивается. ТС с увеличением тепловой нагрузки уменьшалось.

Исследовалось [10] влияние материала термостабилизаторов на их производительность при наличии ручейкового течения конденсата. Эффективность определялась суммой термических сопротивлений системы грунт-воздух: ТС 1) грунта, вмещающего термостабилизатор; 2) сухой части корпуса испарителя; 3) ребер надземного конденсатора; 4) на участке конденсатор – воздух.

Определено [10], что общее суммарное ТС термостабилизаторов из нержавеющей и углеродистой стали на 100 и 50% больше, чем у гладкостенных алюминиевых.

## 1.2 Условное разделение термосифона на части

Закрытый двухфазный термосифон условно можно разделить на три части. Признаки определения их длин, исследователь выбирает самостоятельно.

Выделены [1] испаритель – горизонтальная, прямоугольная часть подвода теплоты. Конденсатор – зона охлаждения, в которой расположен змеевик, с протекающей по нему охлаждающей жидкостью. Взаимное влияние пара и конденсата уменьшено разделением транспортной зоны на две части. По одной изолированной трубе движется только пар в конденсатор, по второй трубе малого диаметра за счет сил гравитации конденсат транспортируется в испаритель.

Предложены [2] испаритель, в виде наклонной по отношению к горизонту зоне подвода тепла, заполненной графитовым порошком, имеющим высокую теплопроводность (при 20 градусах  $\lambda = 0,07 - 1,2 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ). Равномерность температуры поверхности испарителя обеспечивалось теплоизоляцией – каменной ватой. Конденсатор выполнен в виде наклонной по отношению к горизонту оребренной трубы. Транспортная часть разделена на 2 части, аналогично [1].

Разработаны [3] испаритель – нижняя, нагреваемая кабелем часть термосифона с жидкостью и паром, расположенная в рубашке, ниже входа возвратной трубки. Конденсатор – верхняя часть термосифона большего диаметра, охлаждаемая дистиллированной водой, поступающей из холодной ванны (EYELA CA-1111, объем 6,0 л при рабочем диапазоне температур от -20 до 30 °С с точностью  $\pm 2$  °С). Транспортные части – 1) возвратная трубка, по которой жидкость в петлеобразном термосифоне возвращается в испарительную часть; 2) неизолированная зона движения пара от испарителя к конденсатору.

Выделены [4] испаритель – нижняя часть медного термосифона с дистиллированной деаэрированной водой и боковым поверхностным подводом



теплоты. Зона конденсации – омываемая с постоянным расходом водой часть термосифона. Транспортная часть – зона между испарителем и конденсатором.

Предложены [5] испаритель – медный микроканал, установленный на плате нагревательного участка, состоящего из 42 нагревателей. Конденсатор – наклонная часть петлевого термосифона с баком водяного охлаждения. Транспортная часть – наклонная секция стояка со смотровым стеклом для визуализации потока.

Выделены [6] испаритель, состоящий из 14 сваренных трубок. С одной стороны теплоизолированы, с другой стекло. Конденсаторные трубки помещены в теплообменник, поверхность которого теплоизолирована. Адиабатная часть теплоизолирована, расположена между испарителем и конденсатором.

В качестве секции испарения принята [7] нижняя часть термосифона с намотанным вокруг электрическим нагревателем. Конденсаторная секция выполнена из цилиндрической оболочки, окружающей и охлаждающей верхнюю область термосифона водой. Адиабатная секция – теплоизолирована.

Разработаны [8] испаритель – нижняя часть термосифона, с подачей тепла от никель-хромовой проволоки. Конденсатор – верхняя часть термосифона, помещенная в водяной бак, подключенный к циркуляционной термостатической ванне, для поддержания постоянной температуры охлаждающей воды на входе в бак. Адиабатная часть – труба между испарителем и конденсатором. Испаритель и адиабатная часть изолированы керамическим покрывалом и стекловатой.

### **1.3 Флуктуации температуры и давления в термосифоне**

При определенных условиях (плотности теплового потока, конструкции, степени заполнения, используемого теплоносителя) могут реализовываться режимы работы термосифона, при которых происходят периодические выбросы рабочей жидкости из испарительной части в конденсационную и

связанные с ними температурные возмущения. Условия, при которых возникают последние, не установлены.

Флуктуации температуры в испарительной части термосифона зарегистрированы [4] при увеличении плотности теплового потока. Скорость движения пара возрастала до максимальной, соответствующей нагрузке 200 Вт. Дальнейший рост теплового потока увеличивал давление в термосифоне. Вследствие этого уменьшались скорость пара и отрывные диаметры пузырьков. Последнее приводило к снижению флуктуаций температуры в испарительной части термосифона.

Исследовалось [8] влияние подводимого теплового потока на характер флуктуаций температуры в испарителе и конденсаторе. Определено, что градиенты температур в испарителе и конденсаторе противоположно направлены. В баке конденсатора с охлаждаемой водой зарегистрированы флуктуации температуры аналогичные возникшим в конденсаторе.

Флуктуации температуры зарегистрированы [11] на входе и выходе парового канала при условии подвода теплоты 60 Вт, когда вода закипела и конденсат начал стекать в испаритель. Возникло прерывистое движение пара. Тепло от последнего частично передавалось стекающему конденсату. При нагрузке 200 Вт температурные колебания увеличились из-за более устойчивой транспортировки конденсата. Установлены [11] факторы, вызывающие неявную нестабильность кипения в термосифоне – потеря тепла в испарительной части и прерывистое движение потока жидкости и пара.

Проведена [12] серия экспериментов с коэффициентом заполнения термосифона дистиллированной водой 50%. Установлено, что естественная конвекция без кипения жидкости преобладала при тепловом потоке 13,1 Вт/см<sup>2</sup>. При увеличении плотности теплового потока, температура испарительного участка начинала колебаться из-за возникновения кипения. Неустойчивость температуры вызвана изменением коэффициента теплоотдачи от стенки испарителя, за счет возникновения кипения. Амплитуда флуктуации температуры возрастала от 0,8 до 2,8 °С, затем с увеличением теплового потока

уменьшалась до 0,5 °С. Эти изменения объясняются механизмом кипения и соответствующими геометрическими характеристиками пузырьков. С ростом плотности теплового потока число активных центров зародышеобразования на стенке увеличивается. Активация и инактивация центров зародышеобразования при умеренном тепловом потоке приводит к периодическому кипению, характеризующему высокими температурами и колебаниями давления.

Установлено [12], что изменения температур в испарителе и конденсаторе противоположно направлены. Максимальная интенсивность колебаний температуры стенки испарителя и давления пара составляет 0,8 °С и 0,3 кПа соответственно. Основным режимом конвективного теплообмена между поверхностью испарителя и водой является естественная конвекция. В воде наблюдаются пузырьки, без активного зародышеобразования на стенке испарителя. При отсутствии кипения флуктуации температур и давления малы. Установлены флуктуации коэффициента теплоотдачи и степени перегрева стенки. Средний коэффициент теплоотдачи и максимальная интенсивность его колебаний составляют соответственно 8,58 и 0,72 кВт / (м<sup>2</sup> · К). Нестабильность коэффициента теплоотдачи вызвана периодической генерацией изолированных пузырьков, их ростом, движением и разрушением. Процесс способствует перемешиванию жидкости, усиливая конвекцию.

Установлено [12], что при  $q = 38,7$  Вт/см<sup>2</sup> механизмы существенно отличались от наблюдаемых явлений при меньшей плотности ( $q = 13,1$  Вт/см<sup>2</sup>). Определено, что рост пузырьков, поглощающих скрытую теплоту перегретой жидкости, увеличивает коэффициент теплоотдачи стенки. Это приводит к одновременному уменьшению температур стенки секции испарения и воды. Периодически растущие пузырьки поднимают и толкают жидкость вверх, что порождает колебания давления и температуры. Неустойчивость кипения вызвана периодическим отрывом от верхней стенки конденсатора капель конденсата. Максимальная интенсивность флуктуаций температуры стенок и давлений пара 2,8 °С и 800 Па. Средний коэффициент теплоотдачи и максимальная интенсивность колебаний 12,02 и 1,57 кВт / (м<sup>2</sup> · К). Определено,

что конвекция и кипение усиливают флуктуации температур стенки испарителя. Максимальная неустойчивость температур зарегистрирована при температуре стенки 55 °С. При этом возникало кипение, температура стенки и воды снижалась из-за высокого коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Исследовались [13] неустойчивости температур в термосифоне со степенью заполнения дистиллированной водой 30% и величине нагрева  $Q = 28$  Вт. Зарегистрированные колебания температуры в адиабатической части соответствуют скачкам температуры воды в испарителе и давлению в конденсаторе термосифона. Флуктуации вызваны нестабильной работой термосифона, зависящей от режимов кипения. Неустойчивости температурных полей и изменение плотности теплового потока явно выражены до возникновения процесса кипения жидкости.

Исследовалось [14] изменение температуры в двухфазном термосифоне, заполненного дистиллированной водой на 50% при подводимой мощности 150 Вт. Неустойчивость потока пара зарегистрирована с момента повышения нагрузки до выхода на квазистационарный режим (в течении 30 минут перепад температур не превышал 0,1 °С), далее температуры стабилизировались.

Экспериментально исследовано [15] гейзерное кипение в закрытом двухфазном термосифоне. Зафиксированы колебания температуры и давления при тепловом потоке 679 Вт/м<sup>2</sup> и давлении 3,4 кПа.

При возникновении гейзерного кипения рост температуры и давления вызван движением горячей жидкости из нижних положений вверх, за счет расширяющихся пузырей. Смена направления градиента температур возможна при окружении термопары расширяющимися пузырьками, с температурой ниже окружающей их перегретой жидкости.

Экспериментально определено [16], что причиной нестабильной работы термосифона со средним и большим заполнением являются механизмы кипения. Из-за высокого перегрева жидкости скорость роста пузырьков и их размеры настолько велики, что жидкость над участком зародышеобразования внезапно выбрасывается в конденсатор. Это вызывает резкий рост температуры

конденсатора и соответствующее падение температуры жидкости. Последняя уменьшается из-за смешивания оставшейся в испарителе жидкости с охлажденным конденсатом.

При пузырьковом кипении зарегистрированы флуктуации температуры в пределах  $0,5^{\circ}\text{C}$  для жидкости,  $0,8^{\circ}\text{C}$  для пара. Предполагается, что флуктуации связаны с частотой зарождения пузырьков. При приближении к полностью развитому кипению турбулентность, вызванная потоком пузырьков, генерирует сильные колебания давления. В результате пузырьки могут достигнуть критических размеров при более низких перегревах, чем в “стандартных” экспериментах.

#### **1.4 Определение коэффициента теплоотдачи от нагретой поверхности теплоносителю в закрытых двухфазных термосифонах**

Конвективный теплообмен возможен в однофазной среде при фазовых превращениях. К последним относят испарение жидкости и конденсацию пара, сопровождающиеся изменением агрегатного состояния вещества и оказывающих влияние на интенсивность теплообмена. На сегодняшний день теоретические положения процессов тепломассобмена в термосифонах не разработаны на уровне прогностического моделирования характеристик процесса теплообмена при фазовых превращениях в различных условиях эксплуатации теплообменных аппаратов с относительно малыми геометрическими размерами порядка нескольких десятков миллиметров [17]. Несмотря на многочисленное количество исследований в данной области окончательные решения при проектировании аппаратов, в которых осуществляются процессы кипения и конденсации, принимаются на основе эксперимента.

### 1.4.1 Теплообмен при конвекции

Конвекция в зависимости от природы возникновения движения может быть естественной и вынужденной. Естественная конвекция (свободное движение) возникает при разности плотностей горячих и холодных частиц газа или жидкости. Вынужденная конвекция (вынужденное движение) возникает при разности давлений, создаваемой внешним воздействием. При смешанной конвекции влияние естественной составляющей тем больше, чем больше разница температур отдельных частей жидкости или газа и меньше скорость движения среды.

1) Теплоотдача при естественной конвекции около вертикальных труб и пластин.

Определяется режим теплообмена жидкости в пограничном слое (число Рэлея), безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Нуссельта), коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ .

Число Рэлея характеризует отношение теплового потока в среде за счёт подъёмной силы, возникающей вследствие неравномерности поля температуры у поверхности тела, к теплопроводности жидкости или газа и может быть представлено произведением числа Грасгофа и числа Прандтля. Число Грасгофа характеризует интенсивность свободного движения жидкости за счёт разности плотностей, возникающей из-за неравномерности температурных полей рядом с нагретой поверхностью. Число Прандтля характеризует отношение интенсивностей переноса теплоты движением молекул и теплопроводностью. Число Нуссельта характеризует отношение интенсивностей переноса теплоты конвекцией и теплопроводностью.

$$Ra = Gr_{жсх} \cdot Pr_{жс}, \quad (1.1)$$

$$Gr_{жсх} = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_c - t_{жс}) \cdot x^3}{\nu^2}, \quad (1.2)$$

$$Pr_{жс} = \frac{\nu}{a} = \frac{\mu \cdot c_p}{\lambda}, \quad (1.3)$$

$$\overline{Nu}_{лж} = C \cdot (Gr_{хжс} \cdot Pr_{жс})^n \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda_{жс}},$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $m/c^2$ ;  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения, который для жидкости определяется по справочной литературе  $\beta = f(t)$ , для газов равен  $\beta = 1/T_c$ ,  $t_c$  – температура стенки,  $^{\circ}C$ ;  $t_{жс}$  – температура жидкости,  $^{\circ}C$ ;  $x$  – характерный размер, м;  $\nu$  – кинематическая вязкость жидкости,  $m^2/c$ ;  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ ;  $\mu_{жс}$  – динамическая вязкость жидкости,  $Pa \cdot c$ ;  $c_p$  – изобарная теплоемкость,  $Dж/(кг \cdot K)$ ;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $Вт/(м \cdot K)$ ;  $C, n$  – эмпирические коэффициенты.

Определяющий размер – высота трубы или пластины.

1.1)  $Gr_{джс} \cdot Pr_{жс} \leq 10^9$  – ламинарный режим:

$$\overline{Nu}_{лжс} = 0,75 \cdot (Gr_{лжс} \cdot Pr_{жс})^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} = \frac{\overline{\alpha} \cdot l}{\lambda_{жс}}, \quad (1.4)$$

где  $\left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$  – поправка, учитывающая зависимость физических

свойств жидкости от температуры.

1.2)  $Gr_{джс} \cdot Pr_{жс} \geq 6 \cdot 10^{10}$  – турбулентный режим:

$$\overline{Nu}_{лжс} = 0,15 \cdot (Gr_{лжс} \cdot Pr_{жс})^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25} = \frac{\overline{\alpha} \cdot l}{\lambda_{жс}}.$$

1.3)  $10^9 < Gr_{джс} \cdot Pr_{жс} < 6 \cdot 10^{10}$  – переходный режим:

$$\overline{\alpha}_{пер} = \frac{\overline{\alpha}_{лам} + \overline{\alpha}_{турб}}{2}.$$

2) Теплоотдача при естественной конвекции около горизонтальных пластин.

Средний коэффициент теплоотдачи от горизонтальной поверхности рассчитывается как для вертикальной стенки, но с соответствующей поправкой и определяющим размером – меньшей стороной пластины или диаметром.

2.1) Если поверхность теплообмена обращена вверх:

$$\bar{\alpha}_{гор} = 1,3 \cdot \bar{\alpha}_{верт} . \quad (1.5)$$

2.2) Если поверхность теплообмена обращена вниз:

$$\bar{\alpha}_{гор} = 0,7 \cdot \bar{\alpha}_{верт} .$$

3) Теплоотдача при естественной конвекции около горизонтальных труб. Определяющим размером является наружный диаметр трубы.

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,5 \cdot (Gr_{дж} \cdot Pr_{ж})^{0,25} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} = \frac{\bar{\alpha} \cdot d}{\lambda_{ж}} .$$

4) Вынужденное движение жидкости в трубе.

Определяющий размер – внутренний диаметр трубы, температура – средняя между входом и выходом из трубы.

4.1)  $Re_{дж} = \left( \frac{\omega_0 \cdot d}{\nu_{ж}} \right) \leq 2300$  – режим ламинарный:

4.1.1)  $Gr_{дж} \cdot Pr_{ж} > 8 \cdot 10^5$  – вязкостно-гравитационный режим:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,15 \cdot Re_{дж}^{0,33} \cdot Pr_{ж}^{0,43} \cdot Gr_{дж}^{0,1} \cdot \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l = \frac{\bar{\alpha} \cdot d}{\lambda_{ж}} .$$

Поправка  $\varepsilon_l$  учитывает влияние начального гидродинамического участка на теплоотдачу и для вязкостно-гравитационного режима определяется по таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значение  $\varepsilon_l$  при вязкостно-гравитационном режиме

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\varepsilon_l$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1

4.1.2)  $Gr_{дж} \cdot Pr_{ж} < 8 \cdot 10^5$  – вязкостный режим:



$$\overline{Nu}_{дж} = 1,55 \cdot Re_{дж}^{0,33} \cdot Pr_{жс}^{0,33} \cdot \left(\frac{d}{l}\right)^{0,33} \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_c}\right)^{0,14} \cdot \varepsilon_l = \frac{\overline{\alpha} \cdot d}{\lambda_{жс}}.$$

Поправка  $\overline{\varepsilon}_l$  в вязкостном режиме определяется следующим образом:

а) При  $\frac{l}{Re \cdot d} < 0,1$ :

$$\overline{\varepsilon}_l = 0,6 \cdot \left(\frac{l}{Re \cdot d}\right)^{-\frac{1}{7}} \cdot \left(1 + 2,5 \cdot \frac{l}{Re \cdot d}\right).$$

б) При  $\frac{l}{Re \cdot d} \geq 0,1$ :

$$\overline{\varepsilon}_l \approx 1.$$

4.2)  $Re_{дж} = \left(\frac{\omega_0 \cdot d}{v_{жс}}\right) \geq 10^4$  – режим турбулентный:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,021 \cdot Re_{дж}^{0,8} \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l = \frac{\overline{\alpha} \cdot d}{\lambda_{жс}}.$$

Поправка  $\overline{\varepsilon}_l$  в турбулентном режиме определяется следующим образом:

а) При  $\frac{l}{d} < 50$ :

$$\overline{\varepsilon}_l \approx 1 + \frac{2 \cdot d}{l}.$$

б) При  $\frac{l}{d} \geq 50$ :

$$\overline{\varepsilon}_l = 1.$$

4.3)  $2300 < Re_{дж} < 10^4$  – режим переходный:

$$\overline{Nu}_{дж} = K_0 \cdot Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0,25} \cdot \varepsilon_l = \frac{\overline{\alpha} \cdot d}{\lambda_{жс}}.$$

Значение  $K_0$  определяется из таблицы 1.2:

Таблица 1.2 – Значение  $K_0$

$Re_{дж} \times 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3	3,5	4	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

5) Вынужденное движение газа в трубе.

Определяющие размеры те же.

5.1)  $Re_{дж} = \left( \frac{\omega_0 \cdot d}{v_{ж}} \right) \leq 2300$  – режим ламинарный:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,146 \cdot Re_{дж}^{0,33} \cdot Gr_{дж}^{0,1}$$

5.2)  $Re_{дж} = \left( \frac{\omega_0 \cdot d}{v_{ж}} \right) \geq 10^4$  – режим турбулентный:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,018 \cdot Re_{дж}^{0,8}$$

5.3)  $2300 < Re_{дж} < 10^4$  – режим переходный:

$$\overline{Nu}_{дж} = 0,86 \cdot K_0$$

#### 1.4.2 Теплообмен при кипении

Кипение жидкости возникает, когда процессы теплообмена между жидкостью и поверхностью тела происходят при температуре насыщения и выше, и наличии центров парообразования (шероховатости, различные химические неоднородности). Теплообмен в процессе пузырькового кипения является интенсивным и позволяет отвести значительные тепловые потоки при малых перепадах температур между поверхностью и жидкостью. Различают кипение на поверхности нагрева, когда пузырьки пара зарождаются на стенке теплообмена, На рисунке 1.1 представлена экспериментально полученная зависимость плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи от температурного напора при кипении воды в большом объеме [17]:

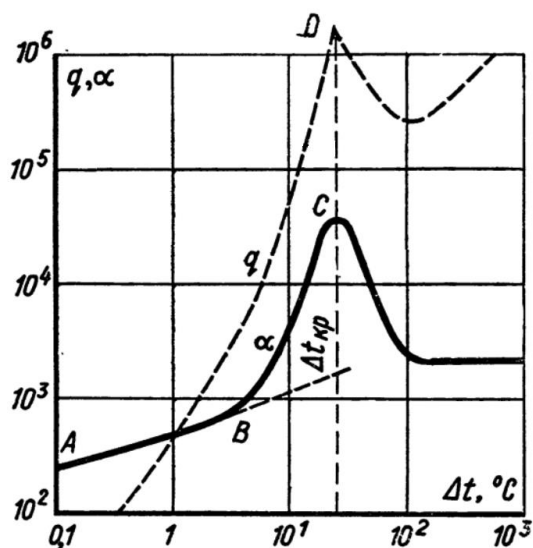


Рисунок 1.1 – Характер изменения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи в функции от температурного напора при кипении воды [17]

В области АВ перегрев жидкости вблизи поверхности недостаточен для образования активной паровой фазы, интенсивность теплообмена определяется закономерностями теплоотдачи при естественной конвекции. На границе раздела “жидкость-пар” происходит испарение, давление пара меньше давления насыщения жидкости при заданной температуре. Отвод тепла осуществляется процессами конвекции и теплопроводности в жидкости, контактирующей с нагретой поверхностью. Для воды при атмосферном давлении область АВ ограничена температурным напором  $\Delta t = 5^\circ C$  и тепловой нагрузкой  $q = 5,8 \cdot 10^3 \text{ Вт} / \text{м}^2$ . В ламинарном режиме коэффициент теплоотдачи пропорционален температурному напору  $\Delta t^{1/4}$ , в переходном и турбулентном  $\sim \Delta t^{1/3}$ .

При дальнейшем увеличении тепловой нагрузки в отдельных углублениях на поверхности нагрева появляются пузырьки пара, увеличивается количество центров парообразования, коэффициент теплоотдачи резко возрастает. Область ВС – пузырьковое кипение, при котором  $\alpha \sim \Delta t^{2,3}$  и может достигать  $\alpha = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot K)$  (точка С). Температурный напор находится в

диапазоне  $\Delta t = 5 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность теплового потока возрастает до критической (точка D). Область BC делится на две подобласти. В области ( $\Delta t = 5 \div 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) на поверхности нагрева образуются пузырьки пара, которые, отрываясь, исчезают в объеме жидкости, перенося тепло в недогретую жидкость. С достижением всего объема жидкости температуры насыщения ( $\Delta t = 10 \div 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), образуются большие пузыри, струи и колонны пара.

С ростом температуры стенки увеличивается число действующих центров парообразования, интенсифицируя процесс кипения. Пузырьки пара, периодически отрываясь от поверхности нагрева, продолжают расти в объеме, так как температура в объеме кипящей жидкости выше насыщения. Например, для воды при  $P = 1 \cdot \text{атм.}$  перегрев жидкости в объеме  $\Delta t = 0,2 \div 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ .

При пузырьковом кипении повышение температурного напора увеличивает поток теплоты, отводимый от нагретой поверхности к жидкости и расходуемый на образование пара. Уравнение теплового баланса при кипении:

$$Q = r \cdot G'' , \text{Вт} ,$$

где  $Q$  – тепловой поток,  $\text{Вт}$ ;  $r$  – скрытая теплота парообразования,  $\text{Дж} / \text{кг}$ ;  $G''$  – количество пара, которое образуется в единицу времени в результате кипения жидкости,  $\text{кг} / \text{с}$ .

Анализ кинограмм [17] процесса пузырькового кипения в большом объеме жидкости показывает, что этот режим претерпевает изменения в зависимости от величины температурного напора (рисунок 1.2).

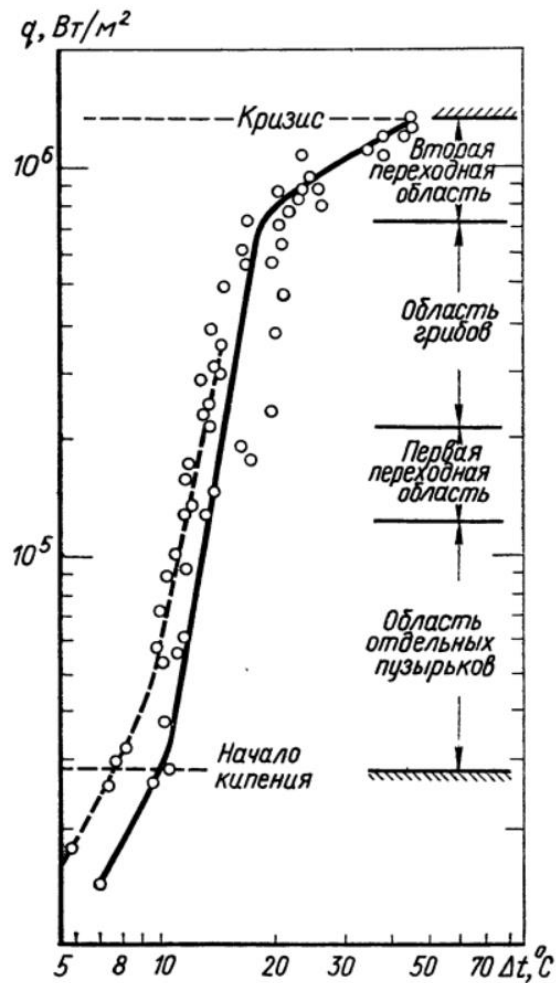


Рисунок 1.2 – Зависимость плотности теплового потока от температурного напора [17]

При некотором значении температурного напора тепловой поток и коэффициент теплоотдачи достигают максимальных значений. При дальнейшем увеличении температурного напора они начинают уменьшаться. Это явление, согласно визуальным наблюдениям [17], связано с образованием на поверхности теплообмена сплошной пленки пара, со значительно меньшей теплопроводностью. Возникает пленочный режим кипения.

Первой критической плотностью теплового потока считают максимальную при пузырьковом кипении. Для воды при  $P = 1 \cdot \text{атм.}$  первая критическая плотность теплового потока  $q_{кр1} \approx 1,2 \cdot 10^6 \text{ Вт / м}^2$ , соответствующее значение температурного напора  $\Delta t_{кр1} = 25 \div 35 \text{ }^\circ\text{C}$  (величины

отнесены к условиям кипения воды в большом объеме. Для других жидкостей и условий величины будут отличаться).

Второй критической плотностью теплового потока является минимальная при пленочном кипении  $q_{кр2} \approx 2,5 \cdot 10^4 \text{ Вт} / \text{м}^2$ ,  $\Delta t_{кр1} \approx 120 \text{ }^\circ\text{C}$ . Между первой и второй критическими плотностями теплового потока чистая форма пузырькового и пленочного кипения невозможна.

Рассмотренные режимы теплообмена соответствуют условиям кипения насыщенной жидкости. В термосифонах возможно кипение жидкости, когда ее температура в объеме (вне слоя, прилегающего к поверхности нагрева), ниже температуры насыщения. Такой процесс называется кипением жидкости с недогревом или поверхностным кипением (часто встречается при вынужденном течении жидкости в канале). Недогрев жидкости и скорость движения теплоносителя по цилиндрическому каналу не оказывают заметного влияния на интенсивность теплообмена в области развитого поверхностного кипения, однако сказываются на величине критических тепловых нагрузок. Так, при  $P = 1 \div 2 \cdot \text{атм.}$ ;  $c_p \cdot \Delta T / r < 0,6$ ;  $\rho_{ж} / \rho_n = 45 \div 1650$  влияние недогрева на величину критической плотности теплового потока можно определить по формуле Кутателадзе [17]:

$$q_{кр.н} = q_{кр1} \cdot \left( 1 + 0,065 \cdot \left( \frac{\rho_{ж}}{\rho_n} \right)^{0,8} \cdot \frac{c_p \cdot \Delta T}{r} \right).$$

Известно [17], что при фазовых превращениях система состоит из двух фаз одной компоненты и имеет 1 степень свободы (т.е. достаточно знать или задать одну переменную, чтобы описать состояние фаз системы, без изменения фазового состава системы). Термодинамика в этом случае сводится к таблицам, где все функции заданы от давления или температуры.

С.С. Кутателадзе при рассмотрении механизма процесса теплообмена при пузырьковом кипении жидкости рекомендовал для расчета коэффициента теплоотдачи следующее выражение [17]:

$$\alpha = 0,0007 \cdot \frac{\lambda_{жс}}{\sqrt{\sigma} \cdot (g \cdot (\rho_{жс} - \rho_n))^{0,2}} \cdot \left( \frac{P_n \cdot q}{r \cdot g \cdot \rho_n \cdot a} \right)^{0,7} \cdot Pr_{жс}^{-0,35}. \quad (1.6)$$

В области умеренных тепловых нагрузок и давлениях 0,2–10 атм. С.С. Кутателадзе рекомендовал следующую формулу [18]:

$$\alpha = C \cdot q^{0,7} \cdot P_n^{0,4}, \quad (1.7)$$

где множитель  $C$  для воды, нагретой на поверхности из цветного металла, принимают  $C=2,6$ .

Д.А. Лабунцов предложил формулу, максимальное отклонение которой составляет  $\pm 35\%$  [19]:

$$\alpha = 0,075 \cdot \left( 1 + 10 \cdot \left( \frac{\rho_n}{\rho_{жс} - \rho_n} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \cdot \left( \frac{\lambda_{жс}^2}{v_{жс} \cdot \sigma \cdot T_s} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot q^{\frac{2}{3}}. \quad (1.8)$$

Все параметры принимаются при температуре насыщения  $t_s$ . Для воды в диапазоне давлений  $P_n = 1 \div 200$  бар формулу Д.А. Лабунцова можно записать в 2 видах:

$$\alpha = \frac{39,3 \cdot (t_c - t_s)^2 \cdot P_n^{0,54}}{(1 - 0,0045 \cdot P_n)^3},$$

$$\alpha = \frac{3,4 \cdot q^{\frac{2}{3}} \cdot P_n^{0,18}}{(1 - 0,0045 \cdot P_n)}, \quad (1.9)$$

где  $P_n$  – давление в барах.

При пузырьковом кипении воды в большом объеме коэффициент теплоотдачи может быть найден по эмпирическим формулам [20, 21]:

$$\alpha = 38,7 \cdot (t_c - t_s)^{2,33} \cdot P_n^{0,5},$$

$$\alpha = 3 \cdot q^{0,7} \cdot P_n^{0,15}, \quad (1.10)$$

где  $t_c$  – температуры стенки,  $^{\circ}C$ ;  $t_s$  – температура насыщения при данном давлении,  $^{\circ}C$ ;  $P_n$  – Давление насыщения, бар;  $q$  – плотность теплового потока,  $Вт / м^2$ .

Формулы применимы для воды в диапазоне давлений  $P_n = 1 \div 40$  бар.

При пленочном кипении воды на горизонтальных трубах коэффициент теплоотдачи может быть найден по формулам (при определяющей температуре  $t_s$  при данном давлении) [22]:

$$\bar{\alpha} = 0,62 \cdot \sqrt[4]{\frac{\lambda_n^3 \cdot (\rho_{жс} - \rho_n) \cdot g \cdot r_*}{\nu_n \cdot D \cdot (t_c - t_s)}},$$

где  $D$  – диаметр трубы,  $m$ ,  $r_*$  – эффективная теплота фазового перехода, учитывающая перегрев пара в пленке,  $Дж/кг$ :

$$r_* = r + 0,5 \cdot c_{pn} \cdot (t_c - t_s).$$

При пленочном кипении на поверхности вертикальных труб и пластин [23]:

$$\bar{\alpha} = 0,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda_n^2 \cdot c_{pn} \cdot g \cdot (\rho_{жс} - \rho_n)}{\nu_n}}.$$



## Выводы по первой главе

По результатам анализа научных публикаций можно сделать вывод, что отсутствует обобщенная и экспериментально подтвержденная теория совместно протекающих в термосифоне процессов конвекции, кондукции и фазовых превращений.

На сегодняшний день отсутствует показатель, позволяющий однозначно охарактеризовать режим работы термосифона, учитывая его конструкцию, теплофизические свойства теплоносителя и степень заполнения им. Эффективность работы двухфазного закрытого термосифона можно оценить по термическому сопротивлению ( $R = \Delta T / Q_{in}$ ), где разницу температур в числителе можно определять между нагревательным элементом и окружающей средой; стенками испарителя и конденсатора; стенкой испарителя и жидкостью в состоянии насыщения; стенкой конденсатора и конденсатом; нижней и верхней частями парового канала); коэффициенту теплоотдачи в испарительной части от поверхности нагрева к теплоносителю; коэффициенту полезного действия (отношению отведенной от конденсатора теплоты и подводимой к испарителю мощности); модифицированному числу Кутателадзе. Стоит отметить, что при расчете термического сопротивления не учитываются потери теплоты термосифона. При определении коэффициента полезного действия сложно определить отведенное от конденсатора количество теплоты, так как конденсационная часть ЗДТ, как правило, охлаждается воздушной средой. Недостатком определения эффективности по модифицированному числу Кутателадзе – большая погрешность (порядка 30%).

Отсутствует точное определение испарительной, адиабатной и конденсационной части термосифона. Условно в ЗДТ выделяют три части. За испаритель принимают нижнюю, равномерно нагреваемую часть термосифона. Конденсатор – верхняя, часть термосифона, охлаждаемая в условиях естественной или вынужденной конвекции, или водяным теплообменником.

Адиабатная часть – теплоизолированная секция термосифона, между испарителем и конденсатором.

Установлено, что подводимая плотность теплового потока и объем заполнения теплоносителем влияют на режимы работы термосифона, при которых возникают флуктуации температур и давления. Выделение основных характеристик флуктуаций (период, размах колебаний) возможно при применении современных, высокоточных, малоинерционных устройств.

Установлено, что до возникновения кипения коэффициент теплоотдачи определяется в условиях естественной конвекции около горизонтальной пластины. При кипении коэффициент теплоотдачи рассчитывается по эмпирическим формулам, рекомендованными С.С. Кутателадзе, Д.А. Лабунцовым и В.П. Исаченко.

## 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДВУХФАЗНОГО ЗАКРЫТОГО ТЕРМОСИФОНА

### 2.1 Экспериментальная установка

Экспериментальное исследование режимов работы двухфазного закрытого термосифона проводилось на установке, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2.1.

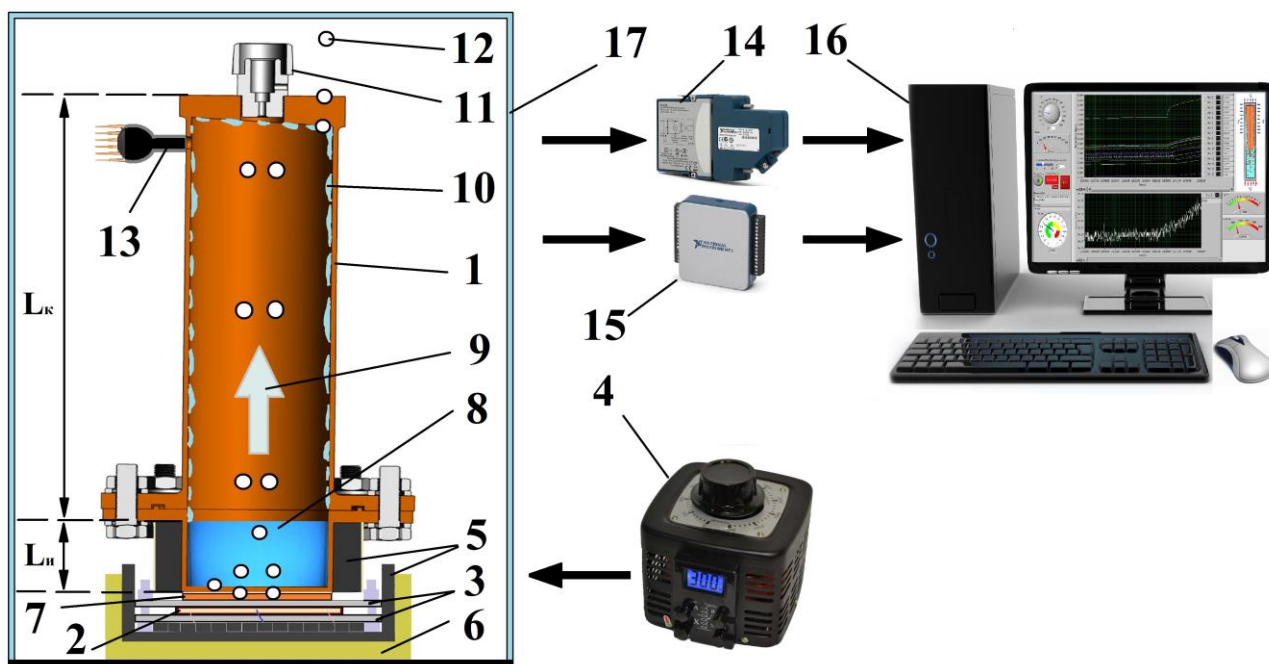


Рисунок 2.1 - Принципиальная схема установки: 1 – термосифон, 2 – силиконовый нагреватель, 3 – алюминиевые пластины, 4 – лабораторный автотрансформатор, 5 – теплоизоляция из вспененного каучука, 6 – каркас из пенополистирола, 7 – медная подложка, 8 – рабочая жидкость, 9 – пары жидкости, 10 – конденсат, 11 – клапан, 12 – термопары, 13 – датчик давления, 14 – аналого-цифровой модульный преобразователь NI 9214, 15 – аналого-цифровой модульный преобразователь NI USB-6000, 16 – персональный компьютер, 17 – стеклянный бокс

Тепловой поток подводился к дну термосифона 1 от плоского силиконового нагревателя 2, зафиксированного между двумя алюминиевыми пластинами 3, и подключенного к лабораторному автотрансформатору 4.

Нижняя часть и боковые стороны участка нагрева теплоизолированы вспененным каучуком 5. Внешний каркас выполнен из пенополистирола 6. Медная подложка 7 под термосифоном 1 использована в качестве теплопроводящего элемента с равномерным распределением температуры по поверхности. Нижняя теплоизолированная вспененным каучуком часть термосифона принята за испарительную часть. Она заполняется рабочей жидкостью 8. При испарении последней образуются пары 9 которые транспортируются в конденсационную часть. Конденсат 10 стекает в зону испарения по стенкам термосифона 1. Над конденсационной частью термосифона расположен клапан 11, предназначенный для регулирования давления. Пятнадцать термопар 12, регистрировали температуры: внешней и внутренней нижней стенки термосифона, рабочей жидкости, паров в нижней, средней и верхней части парового канала, внутренней и внешней верхней стенки термосифона и температуру над термосифоном. Данные с термопар 12 и датчика давления 13 поступали через аналого-цифровые модульные преобразователи National Instruments 14, 15 на компьютер 16. С целью обеспечения постоянных условий теплообмена термосифон 1 размещен в стеклянном боксе 17.

На рисунке 2.2 представлена фотография и чертеж экспериментальной установки.

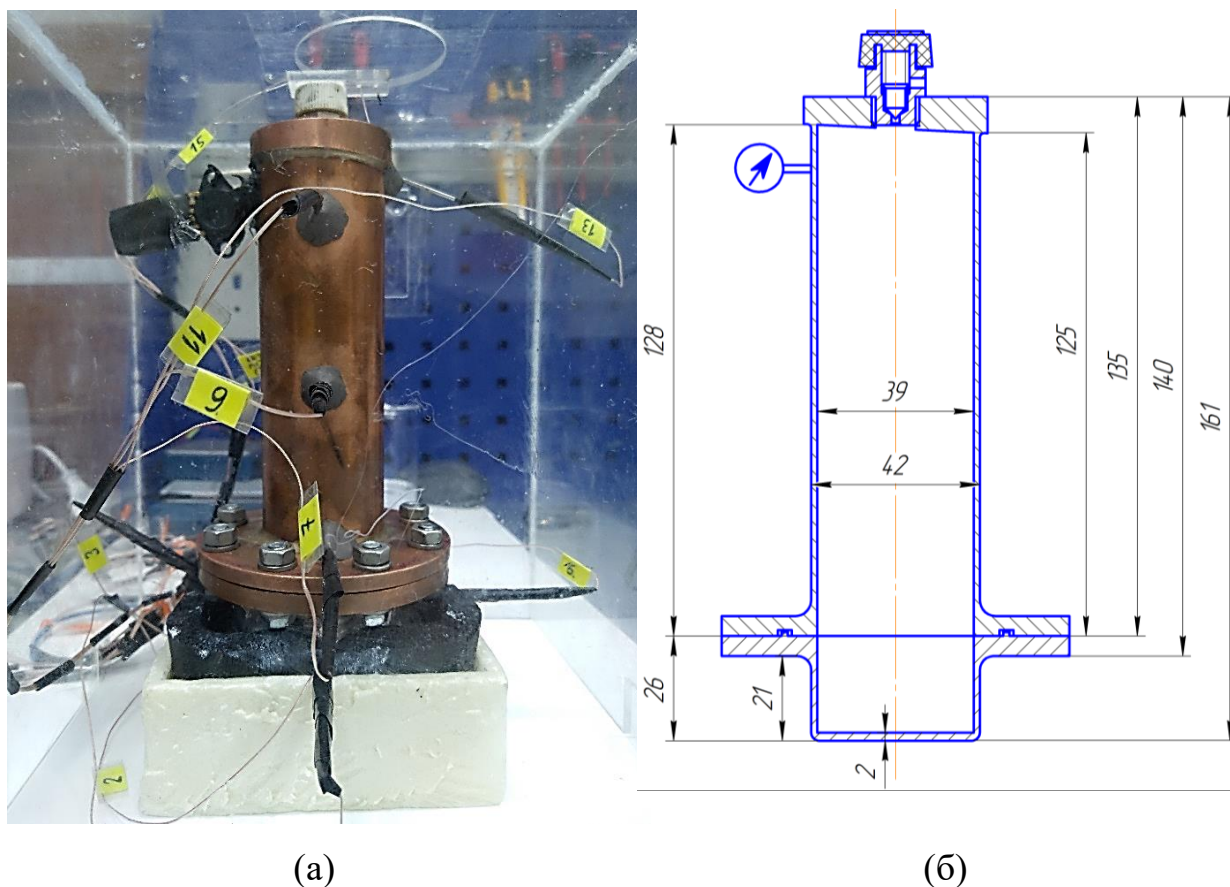


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка: (а) фотокадр; (б) чертеж термосифона в разрезе

Экспериментальная модель двухфазного закрытого вертикального термосифона выполнена в виде соединенных фланцевым соединением с 8 равномерно расположенными по окружности болтами диаметром 6мм верхней и нижней, соосно расположенных, вертикальных, цилиндрических камер. Термосифон условно разделен на 2 части: испарительная с внутренним объемом 22,7 мл и конденсационная (включая фланцевое соединение) внутренним объемом 157,1 мл. Внутренний диаметр термосифона 39 мм, внешний 42 мм. Верхняя стенка термосифона выполнена под углом  $3^\circ$  к горизонту, обеспечивала стекание конденсата преимущественно по одной стороне. Толщина верхней стенки  $7 \div 10$  мм, нижней 2 мм. Для сбрасывания в окружающую среду части воздуха и неконденсирующихся газообразных примесей, которые ухудшают интенсивность конденсации, в верхней камере термосифона расположен выпускной клапан.

## 2.2 Сборка и пуско-наладка экспериментальной установки

С помощью гравера Sparky МК 135Е, зафиксированного на микрометрической подвижке, в нижней и верхней камерах термосифона просверлены одиннадцать отверстий ( $d=1,5$  мм) под термопары (рис. 2.3).

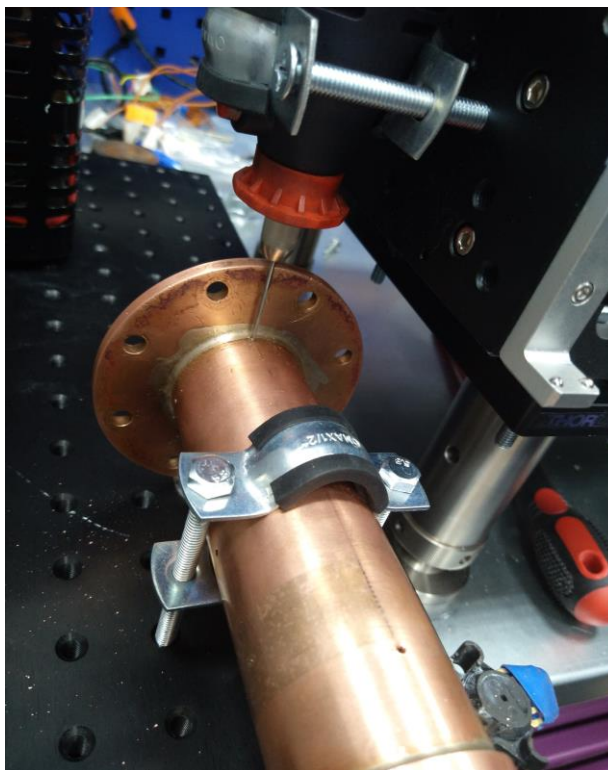


Рисунок 2.3 – Фотокадр процесса сверления

В экспериментальном исследовании использовалось 15 термопар марки ТТ типа К фирмы OMEGA с диаметром королька 130 мкм. С целью фиксации в термосифоне термопар проведена их модификация. Во избежание транспортировки конденсата из парового канала термосифона по кожуху термопар место соединения королька термопар и кожуха обработаны термостойким силиконовым герметиком рис. 2.4.

Одиннадцать термопар установлены в стальные корпуса диаметром 1,2 мм и герметизированы с двух сторон. Конец иглы и часть провода термопары обмотаны изоляционной лентой для увеличения крепости разработанной конструкции игольчатой термопары. Далее термопары устанавливались в термосифон (рис. 2.4).



(a)



(б)



(в)

Рисунок 2.4 – Термопара до (а) и после (б) модификации, фиксация термопар герметиком и холодной сваркой (в)

Определено, что холодная сварка фирмы Astro him предпочтительней для фиксации термопар, чем герметик фирмы Done Deal, т.к. отсутствовало изменение геометрического положения термопары за счет силы тяжести и приложенных небольших усилий (нагрузок) во времени.

Степень вакуумирования полости термосифона чаще всего не играет большой роли, так как термосифон успешно работает и при наличии в его полости некоторого объема воздуха. Наличие воздуха приводит к частичному уменьшению поверхности конденсации и увеличению начального давления. Чем выше рабочее давление в термосифоне, тем меньший объем займет воздух. При исследовании теплопередающих характеристик термосифонов вакуум ( $6,6 \cdot 10^{-3}$  Па) [24] особенно необходим при изучении процесса конденсации, так

как даже небольшое количество воздуха может снизить коэффициент теплоотдачи от пара к стенке термосифона. Так как в работе в основном рассматриваются кипение и испарение, то полость термосифона не вакуумируем.

В экспериментальных исследованиях [25] с паровым обогревом труб тепло неравномерно распределялось по поверхности нагрева, что могло искажать истинные значения критических нагрузок, характеризующих смену режимов кипения. Опыты с электрическим обогревом лишены данного недостатка, но так как большинство известных экспериментов проводилось с тонкими проволоками, то вероятность получения количественных данных, характеризующих технические поверхности нагрева, мало.

Согласно [25] приняты условия торцевого подвода теплоты к термосифону. Данные условия близки к реальным, когда термосифоны устанавливаются непосредственно на теплонагруженные элементы. Источником тепла являлся плоский силиконовый нагреватель (51 мм x 51 мм), рабочий диапазон температур которого  $-60 \div +200$  °С (максимальная кратковременная температура 300 °С) (рис. 2.5 (а)).

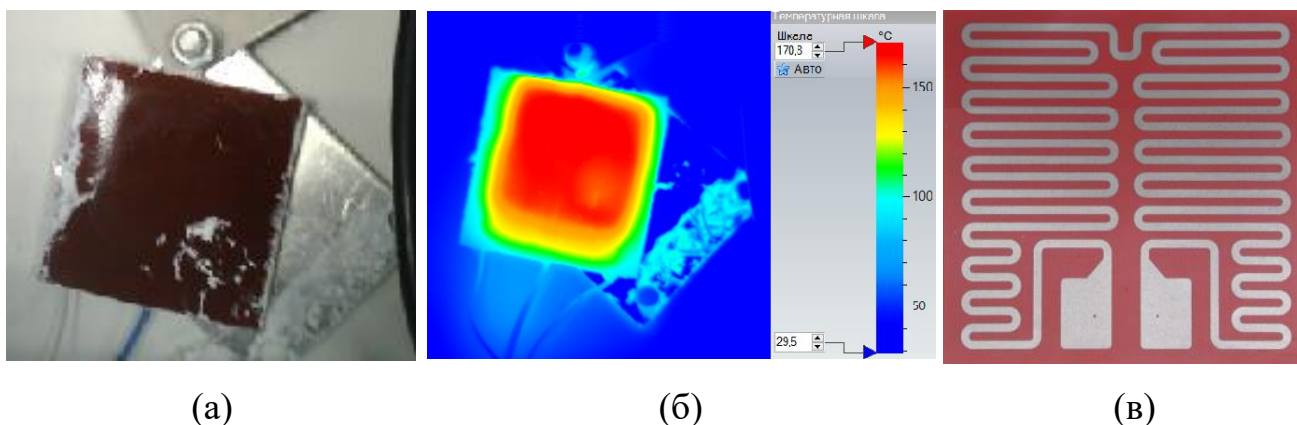


Рисунок 2.5 – Силиконовый нагреватель: фотокадр (а), термограмма (б), вытравленный элемент нагрева (в)

С помощью тепловизора TESTO (с погрешностью не более 2% в диапазоне температур от 0 до +350°С) измерено температурное поле нагревательного элемента (рис. 2.5 (б)). Установлено, что нагревательный



элемент прогревается равномерно, исключением являются края нагревателя, (см. рис. 2.5 (в)).

Силиконовый нагреватель расположен между двух алюминиевых пластин, скрепленных четырьмя болтами. Нижняя и боковые стороны нагревательного участка теплоизолированы вспененным каучуком производства компании Rockwool. Диапазон рабочих температур от  $-180$  до  $550$  градусов. Теплопроводность при комнатной температуре  $0,04$  Вт/(м·К). Внешний каркас выполнен из пенополистирола фирмы POLPAN. Диапазон рабочей температуры  $-50 +75$  °С, теплопроводность  $0,03$  Вт/(м·К) (рис. 2.6).

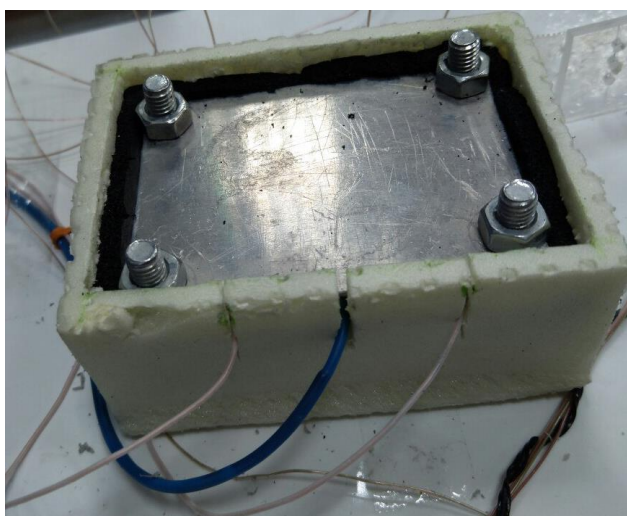


Рисунок 2.6 – Участок нагрева

На участок нагрева устанавливались две медные подложки, в сечениях 1-1, 2-2, 3-3 рис. 2,7 устанавливались по две термопары марки ТТ типа К, погрешность которых составляла  $0,1$  градуса.

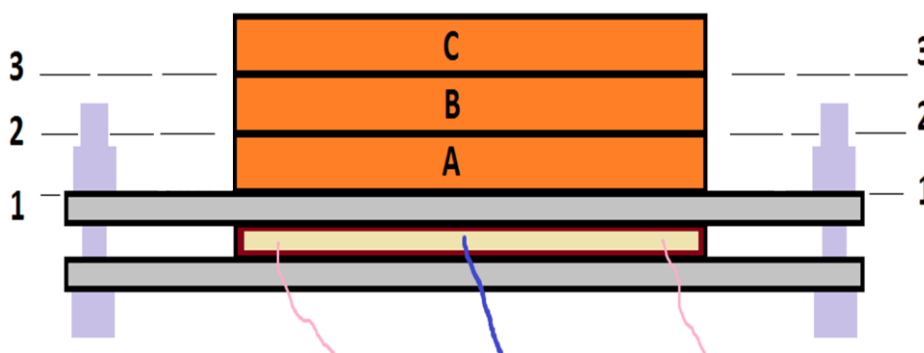


Рисунок 2.7 – Схема нагревательного участка. А, В – медные подложки, С – дно термосифона

Из-за плохого контакта, в сечениях имелись большие зазоры, в которых термопары контактировали с воздухом. Так при установке на лабораторном автотрансформаторе нагрузки 80В, спустя 5000 секунд, когда наступал квазистационарный режим разница между значениями температур, регистрируемых термопарами, расположенными в одном сечении (1-1, 2-2, 3-3) или на разных торцах подложки могла превышать 10 градусов. Чтобы уменьшить взаимодействие с воздухом и добавить устойчивости конструкции, в подложках вырезаны канавки под термопары глубиной 0,6 мм и применена кремнийорганическая термопаста КПТ 8.

Плотность теплового потока рассчитывалась по закону Фурье:

$$q = \frac{\Delta T}{\delta} \cdot \frac{Bm}{\lambda}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta T$  – разница температур между торцами подложки, °С,  $\delta$  – толщина подложки, м,  $\lambda$  – теплопроводность меди, Вт/(м·К).

Разница температур и плотность теплового потока (формула 2.1) по средним за 10 минут значениям параметров в квазистационарном режиме представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Результаты предварительной серии экспериментов

Параметры	Без термопасты	С термопастой
Разница между 2 термопарами (сечение 1-1), $\Delta t$ , °С	0,1	0,1
Разница между 2 термопарами (сечение 2-2), $\Delta t$ , °С	0,2	0
Разница между 2 термопарами (сечение 3-3), $\Delta t$ , °С	0,4	0,2
Разница температур между торцами первой подложки «А», $\Delta t$ , °С	5,1	1,6
Разница температур между торцами второй подложки «В», $\Delta t$ , °С	5,0	1,3
Плотность теплового потока через первую подложку «А», $q$ , МВт/м <sup>2</sup>	0,47	0,15
Плотность теплового потока через вторую подложку «В», $q$ , МВт/м <sup>2</sup>	0,43	0,11
Разница между плотностями тепловых потоков (тепловые потери), $\Delta q$ , МВт/м <sup>2</sup>	0,04	0,04

Согласно анализу таблицы 2.1 видим, что разница между двумя термопарами, установленными без применения термопасты и расположенными

в одном сечении, составляла менее полградуса, но превышала погрешность термопар. Разница температур между торцами подложек уменьшилась в двое и составила примерно 5 градусов. Плотность теплового потока, посчитанная по закону Фурье, через первую подложку составила 470 кВт/м<sup>2</sup>, через вторую 430 кВт/м<sup>2</sup>. Потери составляют 40 кВт/м<sup>2</sup>.

После применения термопасты, теплопроводность которой гораздо больше чем у воздуха ( $\lambda_m = 1 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К}) > \lambda_g = 0,027 \text{ Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$ ), можно заметить, что разница между двумя термопарами в двух из трех сечений не превышали погрешность. Разница температур между торцами в подложках составили 1,6 и 1,3 градуса. Но несмотря на это, плотность теплового потока через подложки составила 150 и 110 кВт/м<sup>2</sup>. А по закону Джоуля-Ленца она составляет 9,6 кВт/м<sup>2</sup>.

Установлено, что при применении термопасты погрешность измерений меньше чем без неё. Но так как к идеальному контакту между двумя подложками приблизиться не удалось, тепловой поток, подводимый к дну термосифон принято определять по закону Джоуля-Ленца, с учётом потерь 15% в окружающую среду:

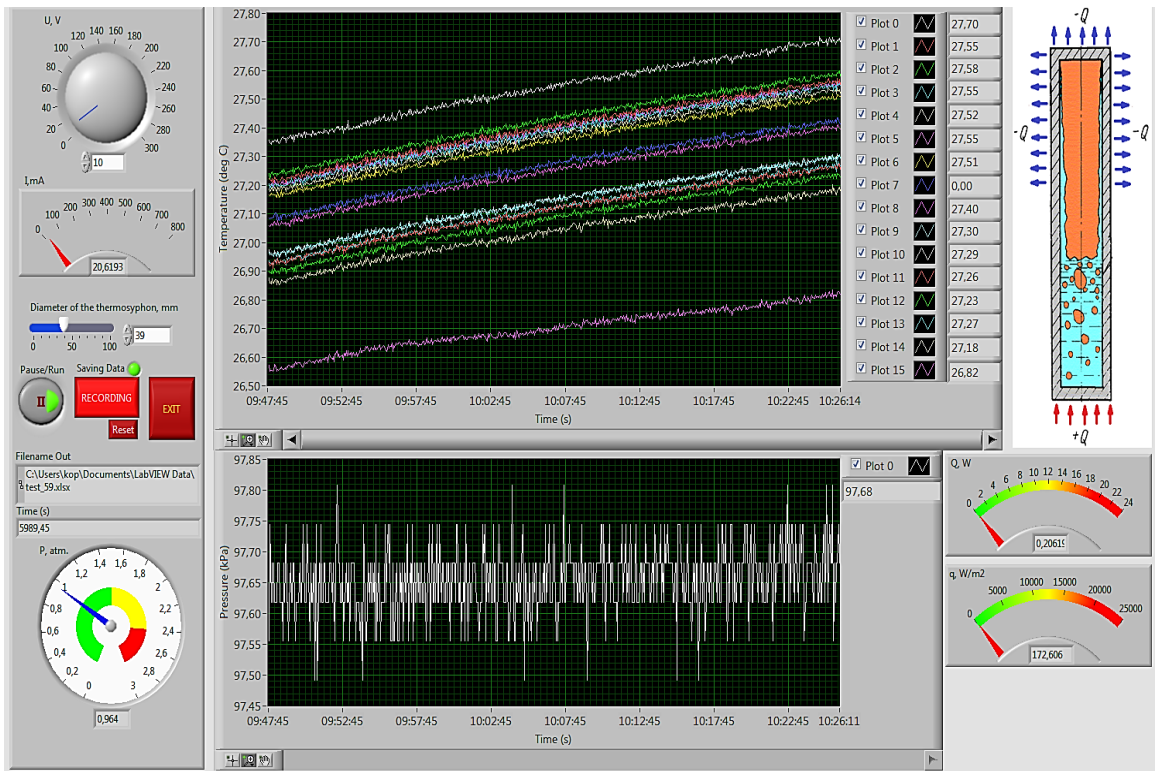
$$q = 0,85 \cdot \frac{U \cdot I}{S}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}, \quad (2.2)$$

где  $U$  – напряжение, В,  $I$  – ток, А,  $S$  – внутренняя площадь поперечного сечения термосифона, м<sup>2</sup>.

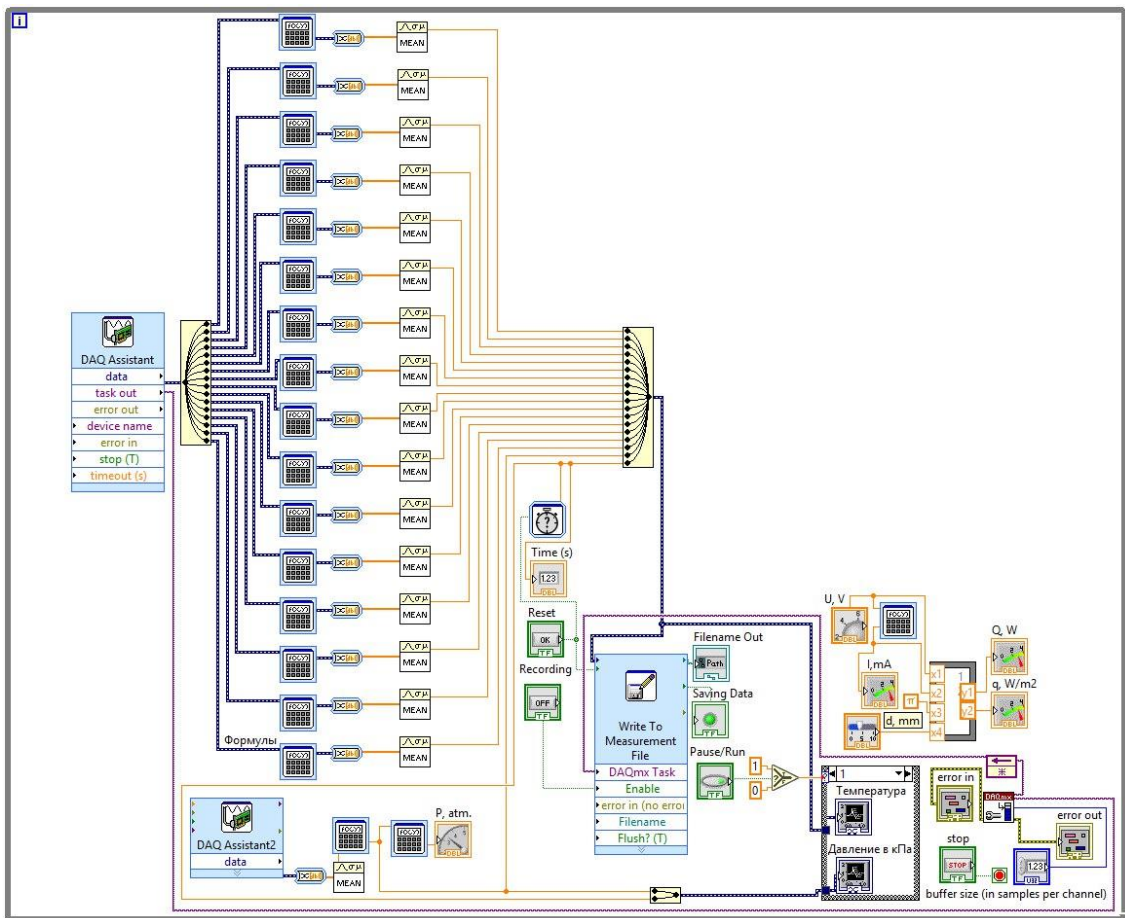
### 2.3 Программное обеспечение

Для регистрации температур и давления разработана программа VI (Virtual Instrument) в графической среде LabView.

На рисунке 2.8 представлен интерфейс программы и её листинг.



(a)



(б)

Рисунок 2.8 – Интерфейс программы VI (а), блок-диаграмма (б)

Задавая в программе входное напряжение и внутренний диаметр термосифона, определялись мощность, подводимая к нагревательному элементу и плотность теплового потока. С помощью разработанной программы откалиброваны термопары, регистрировались температуры и давление в термосифоне.

## **2.4 Методика проведения экспериментального исследования**

Дозирующим устройством (инсулиновым шприцом) заполняют термосифон. Верхнюю камеру термосифона соосно устанавливают на нижнюю и скрепляют 8 болтами. Для увеличения площади опорной поверхности под болтом и гайкой расположены шайбы. Во избежание перекоса термосифона гайки закручивают в перекрестном порядке. На термосифоне до упора закрывают клапан для сброса давления. В канавки медной подложки, закрепленной с помощью термопасты на нагревательном участке, укладывают две термопары, сверху наносится тонким слоем термопаста и на неё устанавливают термосифон. Экспериментальную установку помещают в стеклянный бокс, в нижнее отверстие которого выводят все провода.

Далее, включение компьютера и запуск разработанной программы VI.

Для визуализации регистрируемых параметров в программе VI необходимо выполнить следующие действия:

1) В левом верхнем углу нажать кнопку «Run», для запуска программы. Далее нажимаются кнопки «Pause/Run» и «Recording» (рис. 2.9).

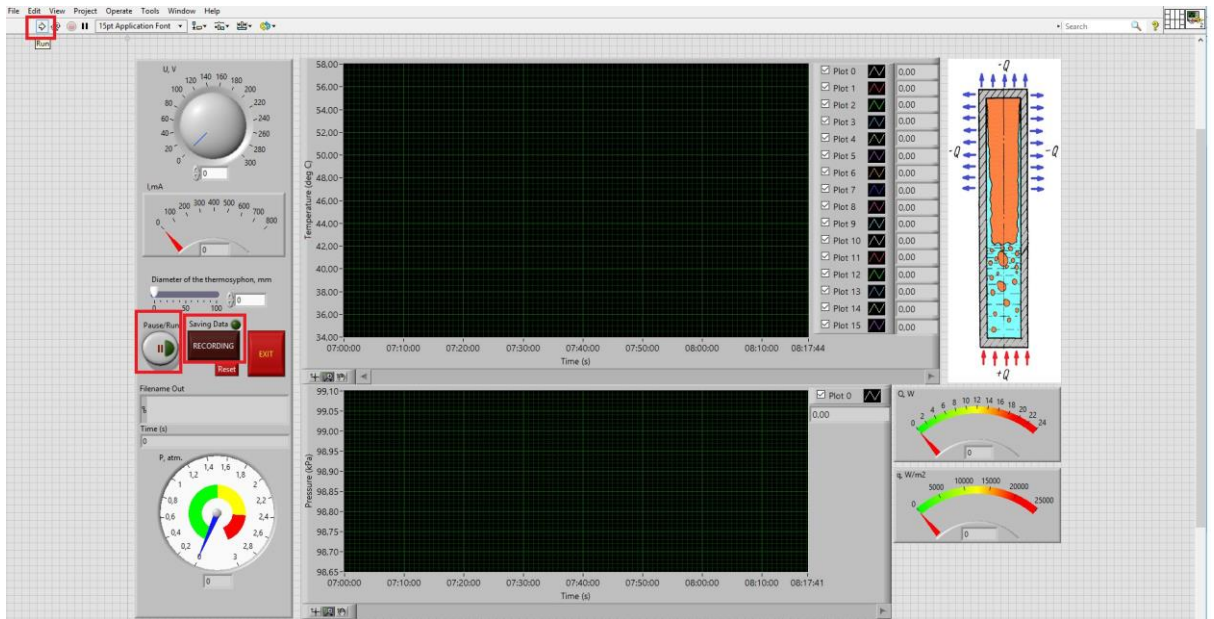


Рисунок 2.9 – Запуск программы

Графические временные зависимости начнут отображаться на экране. Слева отобразятся путь и имя файла, в котором будут записаны регистрируемые параметры и время с момента начала записи.

2) На мультиметре устанавливаем рукоятку на измерение переменного напряжения (рис. 2.10 (а)).



(а)



(б)

Рисунок 2.10 – Мультиметр (а) и включение его в электрическую цепь (б)

Включаем лабораторный автотрансформатор в розетку. Подносим концы проводов от мультиметра к клеммам лабораторного автотрансформатора, замыкая цепь параллельно. Вращая рукоятку автотрансформатора, выставляем необходимое напряжение, ориентируясь на показания мультиметра (например, на рисунке 2.10 (б) выставлено напряжение 50 В).

3) Устанавливаем в программе VI внутренний диаметр термосифона ( $d=39$  мм) и выставленное на мультиметре напряжение. Мощность, подводимая к нагревательному элементу, и плотность теплового потока отобразятся в правом нижнем углу (рис. 2.11).

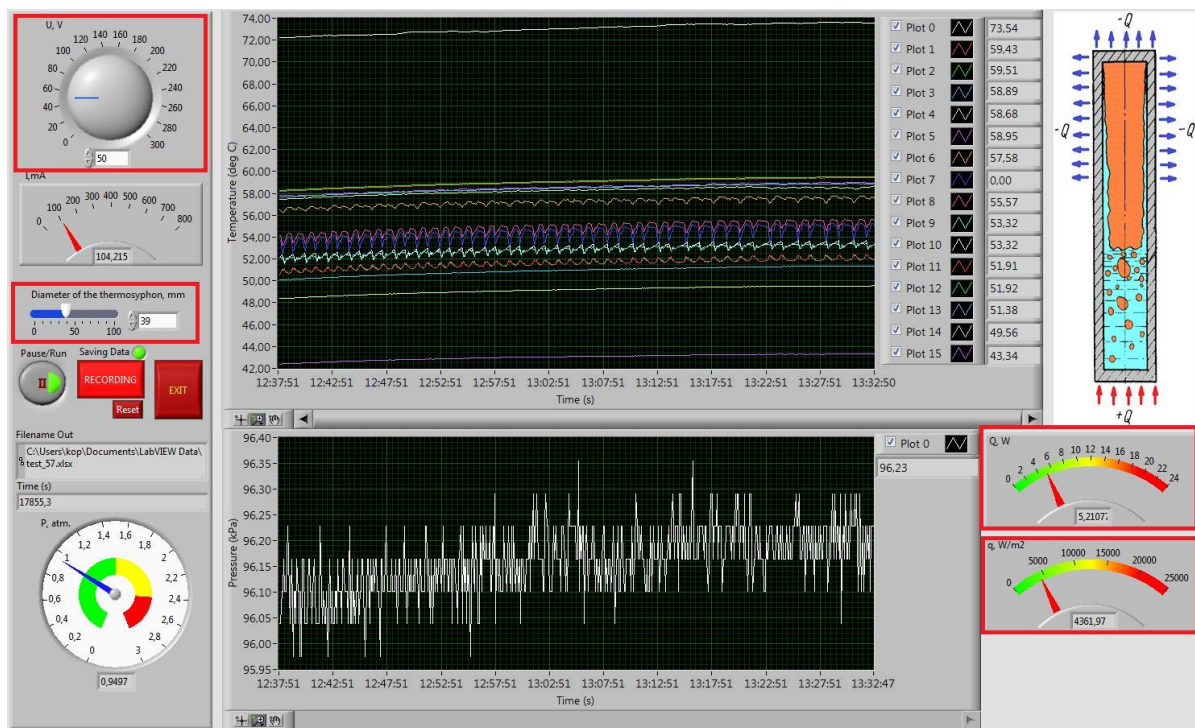


Рисунок 2.11 – Установка параметров (напряжение и диаметр термосифона)

4) При наступлении квазистационарного режима (температура в течение 10 минут изменялась не больше чем на 0,1 °С) на лабораторном автотрансформаторе увеличиваем нагрузку, пока на мультиметре не высветится необходимое значение напряжения.

При завершении серии экспериментов нажимаем кнопку «Recording», чтобы завершить запись регистрируемых параметров. Выходим из

подпрограммы нажав кнопку Exit. Выходим из основной программы нажав крестик в правом верхнем углу или через панель инструментов File – Exit (Ctrl+Q). Выключаем мультиметр, выставив рукоятку управления на значение «OFF». На лабораторном автотрансформаторе выставляем значение «0» и отключаем его от питания. Выключаем компьютер.

Завершив все серии экспериментов происходит обработка результатов в программных обеспечениях Microsoft Office Excel 2016 и Origin Pro 2017.

## **2.5 Выбор области изменения основных факторов**

Теплоноситель выбирается таким образом, чтобы он мог находиться в жидком и газообразном состоянии в рабочем диапазоне температур и давлений.

Спирты, фреоны, хладагенты, эфиры имеют ниже температуру кипения, чем у воды, но при высоких концентрациях они могут вредно влиять на здоровье человека [26]. За счет низкой скрытой теплоты парообразования, они отводят теплоту от источника высокой температуры в меньшем количестве, чем вода. В качестве рабочей жидкости выбрана дистиллированная вода, по причине своей доступности, не токсичности и требуемыми теплофизическими свойствами в рабочем диапазоне температур и давлений.

Материал конструкции выбирается таким образом, чтобы он не вступал в химические реакции с теплоносителем, во избежание возникновения коррозии и неконденсируемых газов, при небольших количествах которых влияние на теплопередающие характеристики малозначимо, но с их ростом в конденсационной части термосифона ухудшается теплоотдача и возрастает начальное давление [27].

В качестве материала термосифона выбрана медь марки М1 ГОСТ 859-2001, высокотеплопроводящий, пластичный и прочный металл, совместимый, не вступающий в химические реакции с водой. Основные свойства металла представлены в таблице 2.2.



Таблица 2.2 – Основные теплофизические свойства меди М1

Свойства	Размерность	Обозначение	Значение
Коэффициент теплопроводности	$Вт / (м \cdot ^\circ C)$	$\lambda$	387
Плотность материала	$кг / м^3$	$\rho$	8940
Теплоемкость	$кДж / (кг \cdot ^\circ C)$	$c$	0,385
Твердость по Бринеллю	$МПа$	НВ	95
Предел кратковременной прочности	$МПа$	$\sigma_B$	290
Относительное удлинение при разрыве	%	$\delta_5$	6
Температура плавления	$^\circ C$	$t_{пл}$	1083
Коэффициент температурного (линейного) расширения	$1 / ^\circ C$	$a \cdot 10^6$	16,7
Температурный коэффициент электрического сопротивления металлов	$1 / ^\circ C$	$\alpha$	4,3
Степень черноты		$\epsilon$	0,018 - 0,87

Геометрические размеры испарительной части термосифона (внутренний диаметр  $d_{вн}$  и длина  $l_u$ ) выбраны из условия упрощения расчетов процесса тепломассопереноса в термосифоне. При  $d_{вн} / l_u = 0,039 / 0,021 = 1,857$  физические процессы происходящие в термосифоне осуществляются в стесненных условиях, но максимально приближенны к условиям кипения в большом объеме (см. 3 главу).

Во избежание возникновения кризиса тепломассопереноса в термосифоне необходимо обеспечить его заполнение теплоносителем в количестве большем минимального. Согласно анализу литературы и расчетам (см. глава 3) минимальную степень заполнения, за которую принималось отношение объемов теплоносителя к испарительной части термосифона, составляет 25%. Принимаем за аварийный режим работы – отсутствие контакта теплоносителя с внутренней поверхностью испарительной части термосифона при заполнении его теплоносителем в объеме меньше минимального.

Контроль теплового потока, подводимого к термосифону от плоского силиконового нагревателя, осуществляется лабораторным автотрансформатором с мультиметром. Варьируемым фактором является

входное напряжение, максимальное значение которого ограничено предельной возможной рабочей температурой нагревателя ( $t=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).

Определив все факторы в исследовании (рабочий теплоноситель, материал и геометрические параметры конструкции, степень заполнения и входное напряжение), по результатам расчетов и предварительной серии экспериментов области варьируемых факторов сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Варьируемые факторы

Фактор	Значение параметра
Степень заполнения дистиллированной водой испарительной части термосифона	15%, 25%, 35%
Входное напряжение	10 – 100 В (шаг 10 В)

Выходные параметры: температурный перепад по высоте парового канала; термическое сопротивление; коэффициент теплоотдачи от нагретой поверхности теплоносителю.

## 2.6 Погрешность определения факторов

Погрешность определения факторов представлена в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Погрешность прямых измерений

Устройство (прибор)	Модель	Диапазон	Погрешность
Термопары	OMEGA, 5ТС-ТТ-К-36-36	0÷300 °C	± 0,1 °C
Датчик давления	MPX4250AP	20÷250 кПа	± 1,5 %
Штангенциркуль электронный	GMC-210	0÷150 мм	± 0,01 %
Мультиметр	MASTECH MY- 67	Переменное напряжение 0÷400 В	± 0,8 %
		Переменный ток 0÷400 мА	± 1,2 %
Инсулиновый шприц	U-100	0÷1мл	± 1 %
Тепловизор	TESTO 876	-20÷280 °C	± 2 %

## 2.7 Выбор плана проведения экспериментальных исследований

После сборки экспериментальной установки для исследования теплофизических процессов в термосифоне, проведения пуско-наладочных работ, настройки высокоточного регистрирующего оборудования (разработки программы в среде LabView, проведения тарировки малоинерционных микротермопар Omega, проведения серии экспериментов по настройке системы нагрева и регистрации теплового потока, подводимого к термосифону), оценки погрешностей измерений составляется план экспериментальных исследований.

Эксперимент может быть пассивным, когда исследователь только регистрирует факторы, не задавая их, и активным, когда исследователь может изменять уровни факторов [28]. В рассматриваемой работе выбраны активные эксперименты, с целью возможности варьирования степени заполнения и подводимого теплового потока, поэтому далее необходимо провести планирование эксперимента, которое может быть последовательным и рандомизированным [29].

При выборе последовательного плана изменение значения фактора происходит с постоянным увеличением или уменьшением переменной на определенную величину. При рандомизированном плане выбор значения переменной происходит случайным образом (принимаемое значение берется то меньше, то больше предыдущего).

Выбор плана проведения экспериментального исследования зависит от вида экспериментов – воспроизводимые или невоспроизводимые [29]. В невоспроизводимых экспериментах, исследуемых объект или установка после исследования не возвращаются в первоначальное состояние. Для таких экспериментов принимается последовательный план. Если по завершению эксперимента изменения незначительны и практически отсутствуют, то эксперимент считается воспроизводимым и принимается любой из двух планов проведения экспериментального исследования.

Эксперименты по исследованию режимов работы двухфазного закрытого термосифона являются воспроизводимыми, так как после каждого эксперимента, возможно вернуть установку в исходное состояние. Изменения свойств материала термосифона и объема заполнения теплоносителем настолько незначительны, что обнаружить их невозможно. Для удобства и рационального использования времени выбрана схема последовательного планирования эксперимента (табл. 2.5).

Таблица 2.5 – План проведения экспериментального исследования

$V_1 = V_{\min} - \Delta V$	$U_1 = U_{\min}$	Регистрация температур и давления во времени
	$U_{i+1} = U_i + \Delta U$	
	$U_n = U_{\max}$	
$V_2 = V_{\min}$	$U_1 = U_{\min}$	
	$U_{i+1} = U_i + \Delta U$	
	$U_n = U_{\max}$	
$V_3 = V_{\min} + \Delta V$	$U_1 = U_{\min}$	
	$U_{i+1} = U_i + \Delta U$	
	$U_n = U_{\max}$	

В таблице 2.5  $i$  – порядковые числа (1, 2, 3, ...);  $n$  – количество экспериментов в серии;  $\Delta$  – шаг.

## Выводы по второй главе

Собрана экспериментальная установка для исследования теплофизических процессов в термосифоне, приведена её схема и описание. Проведены пуско-наладочные работы, настроено высокоточное регистрирующее оборудование (разработана программа VI в среде LabView, проведена тарировка и модификация малоинерционных микротермопар Omega, проведена серия экспериментов по настройке системы нагрева). Определено, что применение термопасты между поверхностями уменьшает термическое сопротивление, но не приводит к идеальному контакту. Закон Джоуля-Ленца выбран для регистрации теплового потока, подводимого к термосифону, с учётом тепловых потерь.

Разработана методика проведения экспериментов по исследованию режимов работы двухфазного закрытого термосифона. Определена область варьирования основных факторов (степень заполнения дистиллированной водой испарительной части термосифона и входное напряжение) и погрешность их определения. Разработан план проведения экспериментов.

## **4 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Целью раздела является технико-экономическое обоснование диссертационной работы, определение и анализ трудовых и денежных затрат, направленных на реализацию проекта, а также уровня научно-технической результативности работы. В рамках данной работы НИР включает в себя проведение экспериментальных исследований на экспериментальной установке – закрытом двухфазном термосифоне, для исследования его теплопередающих характеристик. В экспериментальном исследовании использовалось специальное программное обеспечение LabView 2016. Диссертационная работа оформлена в пакетах программ Microsoft Office 2016 и OriginPro 2017.

Тема магистерской диссертации: Экспериментальное исследование режимов работы двухфазного закрытого термосифона. Научно-исследовательская работа заключается в проведении серии экспериментов на специальной установке с целью определения влияния степени заполнения и плотности теплового потока на теплопередающие характеристики термосифона. При экспериментальном исследовании финансовые затраты должны быть экономически оправданы и целесообразны. Двухфазные термосифоны применяются в нефтехимической, газовой и других отраслях промышленности.

### **4.1 Перечень работ и оценка времени их выполнения**

Студент является инженером 10 разряда (р) оплаты труда. Научный руководитель – доцент кафедры теоретической и промышленной теплотехники ТПУ: 15 р. В таблице 4.1 представлен перечень работ, исполнители и продолжительность выполнения каждой работы в рамках проведения научного исследования.

Таблица 4.1 – Перечень работ, исполнители и продолжительность выполнения каждой работы.

№ раб.	Наименование работ	Количество исполнителей	Продолжительность, дней
1	Выбор темы и направления проведения экспериментов	НР (15 р), Инженер (10 р)	1
2	Поиск, обзор и анализ статей по выбранной тематике	Инженер (10 р)	15
3	Составление плана проведения экспериментов, выбор метода обработки данных. Постановка цели и задач исследования	НР (15 р), Инженер (10 р)	2
4	Закупка необходимого оборудования, дополнительных деталей и инструментов. Заказ рабочей жидкости.	НР (15 р), Инженер (10 р)	3
5	Подготовка рабочего участка, сборка экспериментальной установки, подключение оборудования.	Инженер (10 р)	10
6	Установка и обновление необходимого программного обеспечения	Инженер (10 р)	1
7	Проведение экспериментов	Инженер (10 р)	30
8	Обработка результатов	Инженер (10 р)	15
9	Проведение дополнительных экспериментов с целью оценки повторяемости эксперимента и перепроверки (оценки достоверности) результатов	Инженер (10 р)	15
10	Обработка дополнительных результатов	Инженер (10 р)	7
11	Сравнение результатов экспериментального исследования с результатами других исследователей, определение новизны и написание выводов	НР (15 р), Инженер (10 р)	4
12	Оформление проведенной работы, составление пояснительной записки	Инженер (10 р)	7
13	Проверка проекта	НР (15 р), Инженер (10 р)	1
14	ИТОГО	НР (15 р): 11 дней Инженер (10 р): 111 дней	

#### 4.2 Смета затрат на экспериментальное исследование

Смета затрат на экспериментальной исследование режимов работы двухфазного закрытого термосифона состоит из следующих статей:

$$K_{\text{эк.ис.}} = K_{\text{мат.}} + K_{\text{ам.}} + K_{\text{з.пл.}} + K_{\text{с.о.}} + K_{\text{пр.}} + K_{\text{накл.}},$$

где  $K_{\text{мат.}}$  – материальные затраты;

$K_{\text{ам.}}$  – амортизация;

$K_{\text{з.пл.}}$  – затраты на заработную плату;

$K_{\text{с.о.}}$  – затраты на социальные нужды;

$K_{\text{пр.}}$  – прочие затраты;

$K_{\text{накл.}}$  – накладные расходы.

4.2.2 Материальные затраты на экспериментальное исследование принимаем в размере 1000 рублей на канцелярские принадлежности:

$$K_{\text{мат.}} = 1000 \text{ р.}$$

4.2.3 Амортизация компьютерной техники рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{ам.}} = \frac{T_{\text{исп.}}}{T_{\text{календ.}}} \cdot Ц \cdot \frac{1}{T_{\text{сл.}}},$$

где  $T_{\text{исп.}}$  – время использования устройства;

$T_{\text{календ.}}$  – календарное время (365 дней);

$Ц$  – цена устройства;

$T_{\text{сл.}}$  – срок службы устройства.

В экспериментальных исследованиях использовался компьютер intel core i3-2100 ОЗУ 2 гб с монитором Acer 24" V243H, общей стоимостью 18990 рублей и сроком службы 7 лет. Таким образом, амортизация компьютерной техники составляет:

$$K_{\text{ам.}} = \frac{T_{\text{исп.}}}{T_{\text{календ.}}} \cdot Ц \cdot \frac{1}{T_{\text{сл.}}} = \frac{111}{365} \cdot 18990 \cdot \frac{1}{7} = 825 \text{ р.}$$

4.2.4 Затраты на заработную плату определяют следующим образом:

Рассчитывают месячную заработную плату:

$$ЗП_{\text{мес.}} = k_1 \cdot k_2 \cdot ЗП_{\text{оклад}},$$

где  $k_1$  – коэффициент, учитывающий отпуск, равный 10% ( $k_1 = 1,1$ );

$k_2$  – районный коэффициент, равный 30% ( $k_2 = 1,3$ );



$ЗП_{\text{оклад}}$  – месячный оклад.

Фактическая заработная плата за работу над проектом:

$$ЗП^{\text{факт.}} = \frac{ЗП_{\text{мес.}}}{d} \cdot n^{\text{факт.}},$$

где  $ЗП_{\text{мес.}}$  – месячная зарплата работника ТПУ;

$d$  – количество рабочих дней в месяце ( $d = 21$ );

$n^{\text{факт.}}$  – фактическое число дней в проекте.

Затраты на заработную плату складываются из заработных плат инженера и научного руководителя:

$$\Phi ЗП = K_{\text{з.пл.}} = ЗП_{\text{инж.}}^{\text{факт.}} + ЗП_{\text{НР}}^{\text{факт.}},$$

где  $ЗП_{\text{инж.}}^{\text{факт.}}$  – фактическая заработная плата инженера;

$ЗП_{\text{НР}}^{\text{факт.}}$  – фактическая заработная плата научного руководителя.

Расчет затрат на заработную плату приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Затраты на заработную плату

Должность в ТПУ	Инженер (10 p)	НР (15 p)
$ЗП_{\text{мес.}}$	$ЗП_{\text{мес.}} = k_1 \cdot k_2 \cdot ЗП_{\text{оклад}} =$ $= 1,1 \cdot 1,3 \cdot 17000 = 24310 \text{ p}$	$ЗП_{\text{мес.}} = k_1 \cdot k_2 \cdot ЗП_{\text{оклад}} =$ $= 1,1 \cdot 1,3 \cdot 26300 = 37609 \text{ p}$
$ЗП^{\text{факт.}}$	$ЗП^{\text{факт.}} = \frac{ЗП_{\text{мес.}}}{d} \cdot n^{\text{факт.}} =$ $= \frac{24310}{21} \cdot 111 = 128496 \text{ p}$	$ЗП^{\text{факт.}} = \frac{ЗП_{\text{мес.}}}{d} \cdot n^{\text{факт.}} =$ $= \frac{37609}{21} \cdot 11 = 19700 \text{ p}$
$K_{\text{з.пл.}}$	$K_{\text{з.пл.}} = 128496 + 19700 = 148196 \text{ p}$	

4.2.5 Затраты на социальные нужды (отчисления) принимаются в размере 30% от затрат на заработную плату:

$$K_{\text{с.о.}} = 0,3 \cdot K_{\text{з.пл.}} = 0,3 \cdot 148196 = 44459 \text{ p.}$$

4.2.6 Прочие затраты, принимаются в размере 10% от суммы материальных затрат, амортизации, затрат на заработную плату и затрат на социальные нужды:

$$K_{np.} = 0,1 \cdot (K_{mat.} + K_{ам.} + K_{з.пл.} + K_{с.о.}) =$$

$$= 0,1 \cdot (1000 + 825 + 148196 + 44459) = 20448 \text{ р.}$$

4.2.7 Накладные расходы, принимаются в размере 200% от затрат на заработную плату:

$$K_{накл.} = 2 \cdot K_{з.пл.} = 2 \cdot 148196 = 296392 \text{ р.}$$

Смета затрат на экспериментальное исследование режимов работы двухфазного закрытого термосифона сведена в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Смета затрат на проект

Элементы затрат	Стоимость, руб
1. Материальные затраты	1000
2. Амортизация	825
3. Затраты на заработную плату	148196
4. Затраты на социальные нужды	44459
5. Прочие затраты	20448
6. Накладные расходы.	296392
ИТОГО	511320

Общие затраты на реализацию экспериментально исследования составят 511320 рублей.

Смета затрат на лабораторное оборудование представлена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Смета затрат на лабораторное оборудование

Статьи расходов	Единица измерения	Цена, руб	Объем потребления	Итого, руб.
1) Компьютер intel core i3-2100 ОЗУ 2 гб	Шт.	12090	1	12090
2) Монитор Acer 24» V243H	Шт.	6900	1	6900
3) Клавиатура Gembird Wireless KB-315 Black	Шт.	970	1	1940
4) Мышь Logitech M100 optical USB, черная	Шт.	293	1	293
5) Лабораторный автотрансформатор SUNTEK 2 кВА, 0-300 Вольт, 0-8 Ампер	Шт.	7680	1	7680
6) Плоский силиконовый нагреватель 51 х 51 мм	Шт.	2772	1	2772
7) Теплоизоляция K-Flex Solar HT	Шт.	1158	1	1158
8) Теплоизоляция Polpan N	Шт.	1072	1	1072
9) Беспроводная погодная станция In/OutDoor	Шт.	1848	1	1848
10) Термопары PFA-insulated Thermocouples 5TC-ТТ-К-36-36	Шт.	645	15	9675
11) Термометрический модуль C Series NI-9214	Шт.	104621	1	104621
12) Терминальный блок NI TB-9214	Шт.	22734	1	22734
13) Датчик давления MPX4250AP	Шт.	1250	1	1250
14) Терминальный блок NI TB-9214	Шт.	22734	1	22734
15) Принтер «Kyocera Ecosys M2035DN kx»	Шт.	19370	1	19370
16) Пачка бумаги «SvetoCopy A4 (500 л.)»	Шт.	229	1	229
17) Заправка картриджа	Шт.	150	1	150
18) Набор инструмента «Арсенал AUTO (AA-C1412P131)»	Шт.	8704	1	8704
19) Изоляционная лента «Safeline MULTECH 911 PRO»	Шт.	48	1	48
20) Штангенциркуль цифровой 150 мм GMS-210	Шт.	1680	1	1680
21) Термопаста КПТ-8, теплопроводящая, кремнийорганическая	Шт.	1520	1	1520
22) Герметик термостойкий силиконовый «Done Deal	Шт.	249	1	249
23) Клей-холодная сварка термостойкий, ASTRO him, Total Bond	Шт.	95	1	95
24) Игла одноразовая инъекционная стерильная 18G (1.2 х 50 мм)	Шт.	2	11	22
25) Канцелярские товары	Шт.	1000	1	1000
26) Монтаж	Шт.	34475	1	34475
ИТОГО (К <sub>лаб.об.</sub> ):				264309

### 4.3 Комплексный анализ научно-исследовательского проекта

Результаты экспериментального исследования режимов работы двухфазного закрытого термосифона помогут разработать теоретическую базу совместно протекающих процессов конвекции, кондукции и фазовых превращений для обеспечения проектирования высокоэффективного теплоотводящего оборудования. Двухфазные термосифоны широко применяются в нефтехимической и газовой промышленности в качестве термостабилизаторов основания грунта сооружений (зданий, резервуаров), железных дорог, газопроводов. Также системы охлаждения (отвода теплоты) на основе двухфазных термосифонов применяются при регулировании теплового режима энергонасыщенного оборудования в различных отраслях промышленности (установки осушки и очистки природного газа, элементы металлургических печей, лопатки газовых турбин, трансформаторы, устройства и приборы электронной техники, агрегаты для термической обработки термолабильных продуктов и т.п.).

В настоящей работе проведен анализ влияния плотности теплового потока и объема заполнения дистиллированной водой двухфазного закрытого термосифона на его теплопередающие характеристики.

## Список публикаций

1) Ponomarev K.O., Feoktistov D.V., Marchuk I.V. Evaporation Rate of Aqueous Salt Solutions Droplets // MATEC Web of Conferences. - 2017 - Vol. 91, Article number 01029. - p. 1-4.

2) Ponomarev K.O., Orlova E.G., Nurpeiis A.E. Experimental study of thermosyphon operation when cooling the condensation part by drop irrigation // MATEC Web of Conferences. - 2017 - Vol. 92, Article number 01006. - p. 1-4.

3) Ponomarev K.O., Orlova E.G., Feoktistov D.V. Effect of the heat flux density on the evaporation rate of a distilled water drop // EPJ Web of Conferences. - 2016 - Vol. 110, Article number 01060. - p. 1-4.

4) Ponomarev K.O., Orlova E.G., Zaytsev D.V. Evaporation rate of distilled water drop on the surface of non-ferrous metals // MATEC Web of Conferences. - 2015 - Vol. 37, Article number 01042. - p. 1-4.

5) Feoktistov D.V., Sharapova I.V., Orlova E.G., Ponomarev K.O. Experimental Research of Wetting and Drop Evaporation Processes on a Heated Substrate as a Method for Research Skills Development for Heat and Power Engineering Students // Procedia - Social and Behavioral Sciences. - 2015 - Vol. 206. - p. 307-314.

6) Feoktistov D.V., Orlova E.G., Ponomarev K.O. Experimental Investigation of the Contact Angle at Wetting the Non-ferrous Metals // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2015 - Vol. 93, article number 012011. - p. 1-5. C. 347-349. C. 349-351.

9) Пономарев К.О. Экспериментальное исследование теплофизических процессов в термосифоне // Наука. Технологии. Инновации: сборник научных трудов в 9 т., Новосибирск, 5-9 Декабря 2016. - Новосибирск: НГТУ, 2016 - Т. 4 - С. 291-293.

10) Пономарев К.О., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Флуктуации температуры в паровой части термосифона // Актуальные вопросы теплофизики

и физической гидрогазодинамики: тезисы докладов XIV Всероссийской школы-конференции молодых ученых с международным участием, Новосибирск, 22-25 ноября 2016. - Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2016 - С. 131-132.

11) Пономарев К.О., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Эффективность работы двухфазного термосифона // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем, Санкт-Петербург, 14-19 ноября 2016. - СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2016 - Т. 1 - С. 226-229.

12) Пономарев К.О., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Изменение динамического контактного угла от числа капиллярности // Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Лучшие доклады, Санкт-Петербург, 30 ноября - 5 декабря 2015. - Санкт-Петербург: СПбПУ, 2016 - С. 37-40.

13) Пономарев К.О., Феоктистов Д.В., Орлова Е.Г. Динамика смачивания при высоких скоростях движения линии трехфазного контакта // Современные техника и технологии: сборник трудов XXI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т., Томск, 5-9 октября 2015. - Томск: ТПУ, 2015 - Т. 1 - С. 147-149.