

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт: Электронного обучения
Специальность: 140404 Атомные электрические станции и установки
Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

Тема работы
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ СТЕНД ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЯХ

УДК 621.1.016.7.001.5

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6101	Костромицкий Роман Андреевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Ю.Я. Раков	к.т.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	С.И. Сергейчик	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности	Ю.А. Амелькович	к.т.н., доцент		

По разделу «Автоматизация технологических процессов и производств»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры автоматизации тепло- энергетических про- цессов	В.С. Андык	к.т.н., доцент		

Нормоконтроль

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель ка- федры АТЭС	М.А.Вагнер	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Электронного обучения
Специальность подготовки **140404 Атомные электрические станции и установки**
Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН
А.С. Матвеев

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

дипломной работы

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-6101	Костромицкому Роману Андреевичи

Тема работы:

Экспериментальный стенд для исследования теплообмена при фазовых превращениях

Утверждена приказом директора (дата, номер)

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

В работе представлено:

1. описание собранной установки;
2. теории метода;
3. результаты экспериментов.

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</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>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Обзор литературы для изучения методов исследования теплопроводности и теплоотдачи. 2. Постановка задачи. 3. Разработка принципиальной схемы установки. 4. Расчет основных элементов установки. 5. Проектирование лабораторного стенда.
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Функциональная схема установки, сборочный чертеж камеры кипения, детализированный чертеж и компоновочный чертеж лабораторного стенда,</p>

<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p>Раздел</p>	<p>Консультант</p>
<p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p>	<p>Сергейчик С.И., доцент кафедры менеджмента</p>
<p>Социальная ответственность</p>	<p>Амелькович Ю.А., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности</p>
<p>Автоматизация технологических процессов</p>	<p>Андык В.С., доцент кафедры автоматизации технологических процессов</p>

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

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры АТЭС	Раков Ю.Я.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6101	Костромицкий Роман Андреевич		

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

Студенту:

Группа	ФИО
3-6101	Костромицкому Роману Андреевичу

Институт	Электронного обучения	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	Специалист	Направление/специальность	140404 Атомные электрические станции и установки

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Сетевое планирование и управление созданием лабораторного стенда

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	10.10.16
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	Сергейчик С.И.	к.т.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-6101	Костромицкий Р.А.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа состоит из 96 страниц, 26 рисунков, 19 таблиц, 31 источника литературы.

Ключевые слова: кипение жидкости в большом объеме, тепловые трубки, теплопроводность, теплообмен, теплоотдача.

Объектом исследования являются процессы при фазовых переходах жидкости.

Цель работы – создание экспериментального стенда для исследования теплообмена при фазовых превращениях.

В процессе работы проводилось изучение журнальных статей, монографий и других источников по данной теме.

В результате исследований были получены значения эффективного коэффициента теплопроводности тепловой трубы и теплоотдачи при кипении жидкости в большом объеме, а также находились критериальные зависимости.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: среда - вода при атмосферном давлении; интервал температур от 20 до 100 °С.

Степень внедрения: использование установки в учебном процессе, в лабораторных условиях.

Область применения: теплофизика и теплоэнергетика

Экономическая эффективность: упрощение и уменьшение затрат на конструирование установки для измерения характеристик тепловой трубы.

В будущем планируется улучшение и совершенствование методов изучения коэффициента теплопроводности и теплоотдачи.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010, диаграммы построены в книге Microsoft Excel 2010, рисунки выполнены с помощью программы CorelDRAW 13, редактор формул Math Type 6.0.

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		7

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ

1. Теплопроводность – молекулярный перенос теплоты в телах или между ними, обусловленный переменной температурой в рассматриваемом пространстве.

2. Коэффициент теплопроводности – физический параметр вещества, зависящий от температуры, давления и рода вещества.

3. Плотность теплового потока – это количество теплоты, проходящее в единицу времени через единицу площади изотермической поверхности.

4. Теплоотдача - теплообмен между поверхностью тела и окружающей средой.

5. Градиент температуры – вектор, направленный по нормали к изотермической поверхности в сторону возрастания температуры и численно равный производной от температуры по этому направлению.

6. Коэффициент теплоотдачи – характеризует интенсивность теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

7. Тепловой поток – количество теплоты, переносимое через какую-либо поверхность в процессе теплообмена.

8. Температурный напор – разность характерных температур среды и стенки или двух сред, между которыми происходит теплообмен.

λ – теплопроводность, $Вт / (м \cdot К)$;

T – температура, $К$;

Q – тепловой поток, $Вт$;

q – плотность теплового потока, $Вт / м^2$;

$gradT$ – градиент температуры, $К / м$;

F – площадь, $м$;

α – коэффициент теплоотдачи, $Вт / м^2К$;

Δt – температурный напор, $К$.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		8

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	11
1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	12
1.1. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МАКСИМАЛЬНЫЙ ТЕПЛОВЫЙ ПОТОК ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ	16
1.2. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА НА КРИВУЮ КИПЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ	20
1.3. КИПЕНИЕ ВОДЫ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ	23
1.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРТЕРИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ	30
1.5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДВУХ ЖИДКОСТНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБОЙ ..	32
2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ	36
2.1. ТЕОРИЯ МЕТОДА	36
2.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	42
2.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ	45
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ	47
3.1. ТЕОРИЯ МЕТОДА ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ	47
3.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ	48
3.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ С УСТАНОВКОЙ	49
3.4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ	50
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	51
5. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕРМОСТАТЕ	59

						ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата			9

Графический материал:

ФЮРА.ХХХХХХ.002 МЧ. Стенд для исследования теплообмена при фазовых переходах. Компоновочный чертеж.

ФЮРА.ХХХХХХ.003 С2. Установка для исследования теплообмена при фазовых переходах. Схема функциональная.

ФЮРА.ХХХХХХ.004 СБ. Камера кипения. Сборочный чертеж.

ФЮРА.ХХХХХХ.005. Детализовочный чертеж.

ФЮРА.421000.006 С2. АСР температуры в термостате. Схема функциональная.

ФЮРА.ХХХХХХ.007. Сетевое планирование и управление созданием лабораторного стенда.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		10

ВВЕДЕНИЕ

Огромное число работ, как экспериментальных, так и теоретических посвящены проблемам кипения, в том числе – при пузырьковом и пленочном режимах. Это связано, во-первых, с практической значимостью этого процесса. Кипение широко используется во многих отраслях промышленности и энергетики. На ТЭЦ, АЭС, кипение жидкостей – основной способ генерации пара высокого давления и температуры. Для АЭС кипение – отличный способ охлаждения атомных реакторов, позволяющий отводить большие тепловые потоки, при малом температурном напоре. В электронике, авиа и космически технологиях крайне важна разработка компактных и легких теплообменных устройств, использующих в качестве рабочего тела кипящую жидкость.

В итоге исследований была установлена важная для практических приложений закономерность. А именно, весь накопленный объем сведений позволяет прийти к заключению, что коэффициент теплоотдачи при развитом режиме кипения жидкости мало чувствителен к целому ряду таких внешних воздействий, как изменение вибрации, организация циркуляции кипящей жидкости и т.д. Общая тенденция здесь такова, что эти внешние факторы оказывают влияние на теплоотдачу в начальной области, при возникновении пузырькового режима, их влияние быстро ослабевает или совсем вырождается.

Вместе с этой особенностью процесса существует и другая – довольно значительное влияние на интенсивность теплообмена ряда внутренних эффектов, обычно объединяемых термином «поверхностные условия». К их числу относятся состояние, условие смачиваемости, материал и чистота поверхности нагрева.

Проведение экспериментальных исследований и лабораторных работ является одним из инструментов для закрепления и углубления знаний, полученных из теоретического курса, а также помогают получить широкое представление о тепломассообмене.

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		11

1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ, СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросами зависимости между температурой твердой поверхности и скоростью кипения впервые занялся Широ Нукияма (Shiro Nuyiyama) в 1934 г. Он изучал процесс кипения жидкости вокруг погруженной в нее платиновой проволоки, по которой протекал электрический ток.

Большой вклад в изучение теплообмена при кипении внес Кутателадзе С.С. На рисунке 1 изображены полученные Кутателадзе опытные кривые $\alpha = f(\Delta T)$ для воды и жидкого металла. [11]

На рисунке 2 показана зависимость коэффициента теплоотдачи α от величины теплового потока q . [10]

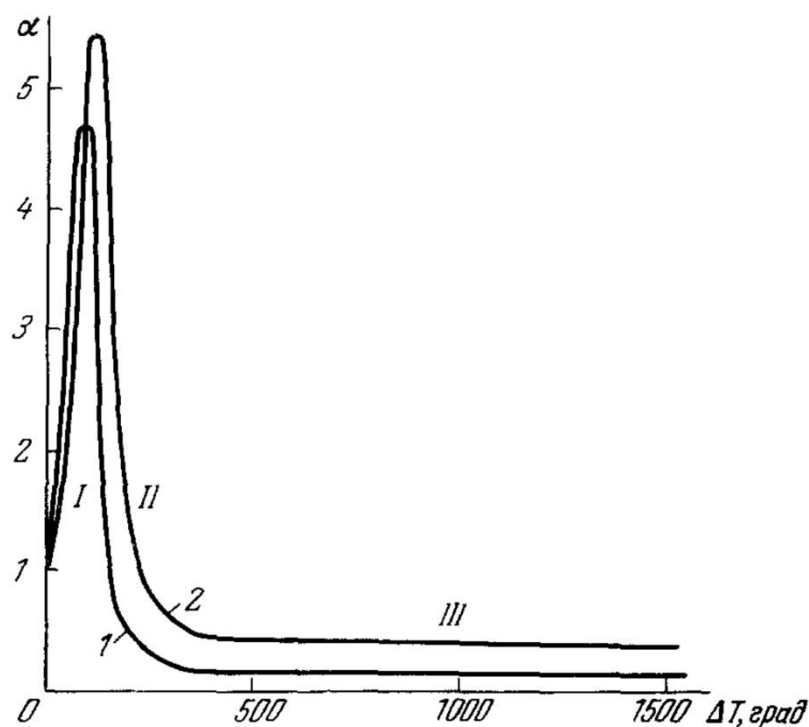


Рисунок 1 - Зависимость коэффициента теплоотдачи α от ΔT при кипении [11]

1 – вода; 2 – жидкий металл; I – пузырьковое кипение; II – переходное; III – пленочное кипение.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

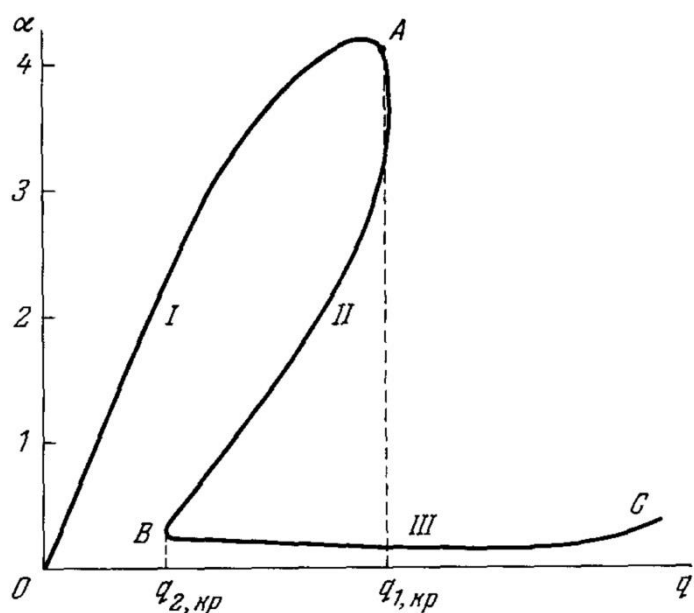


Рисунок 2 - Зависимость коэффициента теплоотдачи α от теплового потока q [10]

$q_{1кр}$ - тепловой поток, соответствующий первому кризису; $q_{2кр}$ - тепловой поток, соответствующий второму кризису; OA – пузырьковое кипение; AB – переходное кипение; BC – пленочное кипение.

Уменьшению размера испарителя при фиксированной мощности, а также уменьшению требуемого времени на производство пара способствует увеличению абсолютного значения тепловой нагрузки отводимой от поверхности нагрева испарителя.

Для постановки задачи обратимся к работе Нукиямы, а именно к кривой кипения (рисунок 3) [1], впервые предложенной японским исследователем Нукиямой (Nukiyama) в 1935г. Известно, что скорость парообразования и тепловая нагрузка, имеют максимум на кривой $q = f(\Delta T)$, где ΔT - температурный напор, т.е. разница между температурой насыщения и температурой нагрева поверхности, q - тепловая нагрузка. Для контролирования скорости парообразования очень важно определить максимальное значение тепловой нагрузки. На рисунке 3 показана кривая кипения воды в виде схемы. Участок AB характеризуется тем, что теплообмен

происходит за счет теплопроводности и конвекции, а пузырьки не образуются. Пузырьковое кипение (точка В) на центрах парообразования начинается с увеличением тепловой нагрузки. Когда увеличивается температурный напор, образуется все больше центров парообразования и этот участок характеризуется как развитое пузырьковое кипение (отрезок ВС). В этот момент коэффициент теплоотдачи резко увеличивается и достигает значения $8000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$ [1], что объясняет необходимость изучения данного явления для техники.

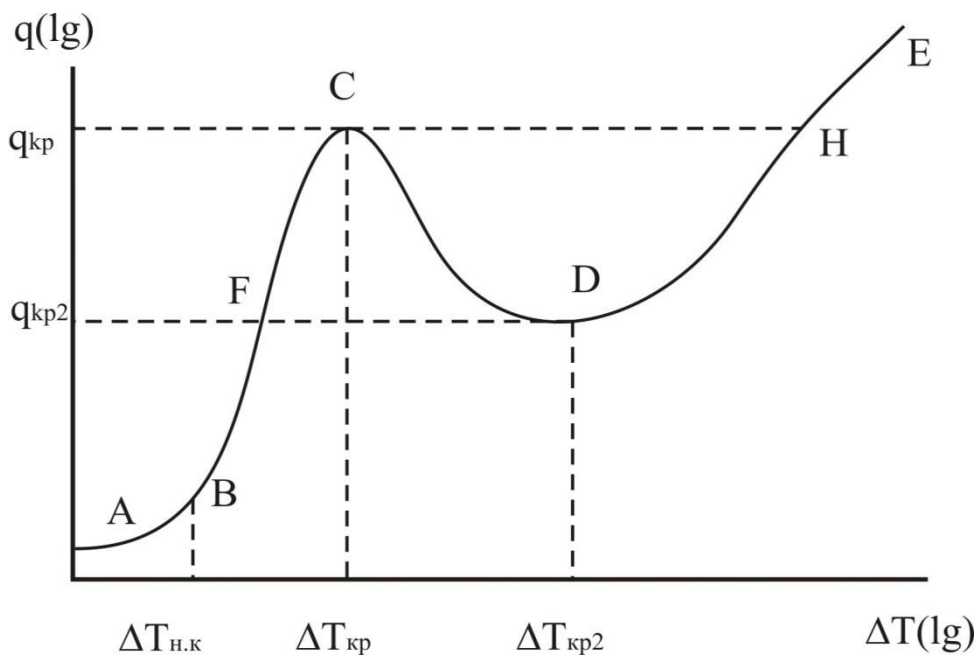


Рисунок 3 - Кривая кипения воды

По мере роста тепловой нагрузки цепочки из паровых пузырьков сливаются в струи пара, а при значительном увеличении тепловой нагрузки поверхность раздела струй пар-жидкость становится неустойчивой. При этом приток жидкости к греющей стенке затрудняется, и создаются условия, при которых пар начинает расстилаться над поверхностью нагрева (точка С). Точка С характеризуется так называемым кризисом теплоотдачи (кризис кипения), при котором пузырьковое кипение резко преобразуется и достигается критическая тепловая нагрузка [3-5]. Точку С также называют «точкой выгорания» [6].

Процесс развития кипения после достижения точки С зависит от того, какая величина является контролируемой независимой переменной – температура нагревателя или тепловая нагрузка. Например если контролируемой величиной является температура нагревателя и она постоянно растет (когда в качестве источника тепла используется например, конденсирующийся пар) то после достижения точки С будет развиваться режим переходного кипения (отрезок CD). Этот участок характеризуется двумя режимами кипения – пленочный и пузырьковый. При достижении точки D наступает режим пленочного кипения, устойчивость которого объясняется неспособностью жидкости смачивать поверхность нагрева из-за отделения жидкости паром от поверхности нагрева. Теплопередача излучением возрастает на участке DE.

Независимой контролируемой переменной будет тепловая нагрузка в случае нагрева поверхности электрическим током. В таком случае при незначительных повышении тепловой нагрузки в точке С температура скачком изменится до значения в точке Н. Большинство поверхностей нагрева не выдерживают последующего увеличения температуры и приходят в неисправность или плавятся. Следовательно, возможна большая неустойчивость процесса кипения, если температура нагревателя не контролируется. Следовательно для повышения устойчивости процесса кипения следует стабилизировать температуру поверхности нагрева. На практике кривая CD является неустойчиво и сложно получается.

Если после сильного нагрева понижать тепловую нагрузку – отрезок EDF – то с достижением точки D температура будет понижаться до соответствующей в точке F. Это называется гистерезисом кипения, т.е. при нагревании теплоотдающей поверхности нагревателя и при ее охлаждении ход кривой не совпадает. Если уменьшать тепловую нагрузку, то кривая не возвратится из Н в С, а пойдет вдоль отрезка HD и «скачком» перейдет из D в

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		15

Г. Отрезок HD называется областью сфероидального состояния жидкости, т.к. жидкость не смачивает поверхность нагрева.

Процесс пузырькового кипения очень сложен для теоретического описания и не поддается прямому численному моделированию, поскольку отсутствует замкнутое математическое описание вопроса вследствие неопределенности границы раздела фаз. Даже с помощью детального анализа размерностей экспериментальные данные по тепловым нагрузкам и коэффициентам теплоотдачи не всегда удовлетворительно совпадают с теоретическими.

1.1. ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА МАКСИМАЛЬНЫЙ ТЕПЛОВОЙ ПОТОК ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ

Основной задачей работы Е.А. Казаковой [7] было исследование зависимости величины этого максимального теплового потока (q_{\max}) от давления.

Более ранними исследованиями было установлено, что кривые зависимости теплового потока и коэффициента теплоотдачи от разности температур между греющей стенкой и кипящей жидкостью имеют явно выраженный максимум и минимум и в общем случае могут быть представлены рисунке 4 [7]. Известно также, что для воды значение максимального теплового потока достигает около $10^6 \text{ ккал/м}^2\text{час}$. Основной задачей работы явилось исследование зависимости величины этого максимального теплового потока (q_{\max}) от давления.

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		16

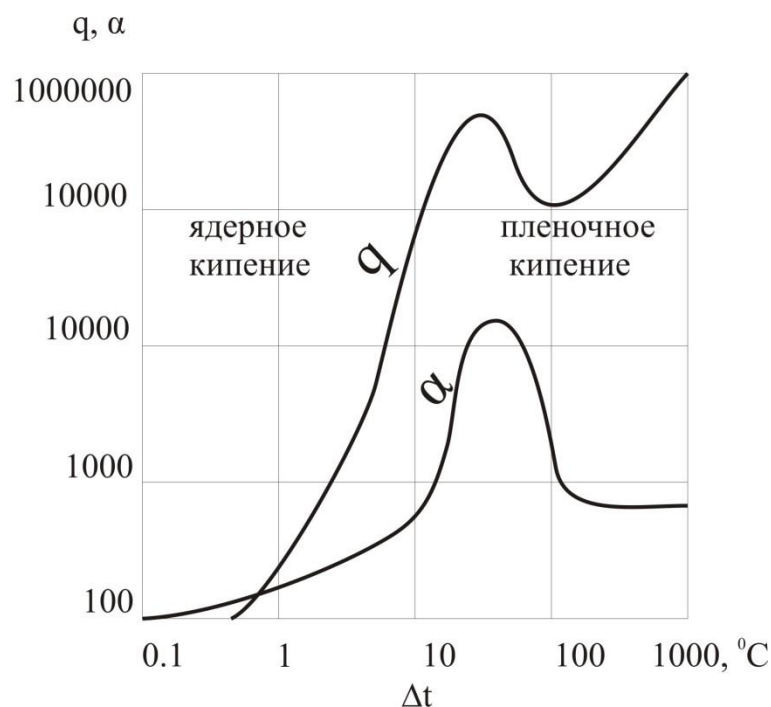


Рисунок 4 - Зависимость q и α от Δt при кипении жидкости [7]

Поставленная задача требовала экспериментальной установки высокого давления, которая позволила бы получить на поверхности нагрева весьма большие тепловые нагрузки (рисунок 5) [7]. Это определило выбор методики эксперимента. В качестве греющей поверхности была применена проволока, обогреваемая электрическим током.

Экспериментальная установка

Кипятильник 1 представлял собой стальной, точенный цилиндрический аппарат высокого давления, испытанный до 300 ат с внутренним диаметром 50 мм и длиной 600 мм. Аппарат заполнялся дистиллированной водой, и кипение производилось на поверхности горизонтально натянутой проволоки. Медные вводы, припаянные к нагревательной проволоке, уплотнялись в сальниках асбестовой набивкой и резиновыми пробками. Снаружи сальники охлаждались водой. Проволока нагревалась постоянным током от мощного генератора, обеспечивающего постоянство напряжения. В качестве нагревателей были применены медная проволока (диаметром 0,135 мм) и нихромовая (диаметр 0,29 мм) длиной от 200 до 300 мм. Для каждого опыта брался новый отрезок проволоки. Кипятильник соединялся с обратным холодильником,

										Лист
										17
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата						

представляющим собой трубу в трубе. Охлаждающая жидкость подавалась из напорного бака 2, а после прохождения через холодильник стекала в один из приемных бачков 3; ее температура до и после холодильника измерялась термопарами и термометрами. Температура стекающего обратно конденсата контролировалась термопарами, вмонтированными в трубку, соединяющую холодильник с кипятильником.

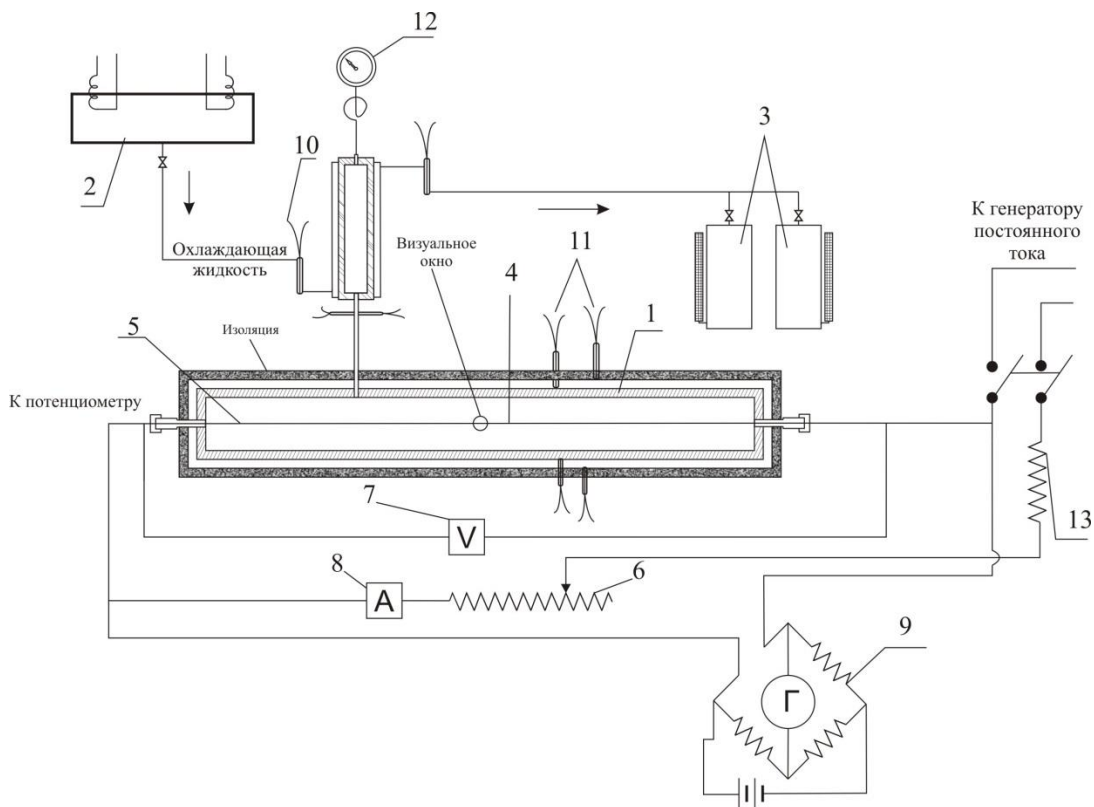


Рисунок 5 - Экспериментальная установка [7]

1 – аппарат высокого давления; 2 – напорный бачок; 3 – приемник; 4 – нагревательная проволока; 5 – электрод; 6 – регулировочное сопротивление; 7 – вольтметр; 8 – амперметр; 9 – мост Уитстона; 10 – термопары медно-константановые; 11 – термопары хромель-алюминиевые; 12 – манометр; 13 – сопротивление

Во избежание потерь тепла в окружающую среду кипятильник был помещен в металлический кожух, снабженный регулируемым электрическим обогревом. Термопары, вмонтированные в стенки кипятильника и наружного кожуха, давали возможность поддерживать нужный режим. Тепловой поток

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

определялся по расходу электричества, измеряемому прецизионными амперметром и вольтметром 7-8. Для большей надежности в схему включались два амперметра и два вольтметра. Тепловое напряжение проволоки регулировалось системой реостатов 6. Температура кипения воды измерялась потенциометрически с помощью термопары, введённой в кипятильник через сальник. Давление определялось по образцовому манометру 12, установленному на обратном холодильнике.

Перед проведением опыта с помощью наружного обогрева в кипятильнике достигалось необходимое давление. При установившемся режиме включался постоянный ток от генератора. Выведением реостатов постепенно усиливался тепловой поток, пока не достигался q_{\max} . Момент максимального потока определялся по переплавлению проволоки, обусловленному резким. Резким повышением температуры из-за перехода в область пленочного кипения.

Вся методика эксперимента и измерений предварительно была проработана при атмосферном давлении на стеклянном аппарате, который был включён вместо стального кипятильника в ту же схему приборов.

Выводы

По результатам проделанной работы были сделаны следующие выводы:

1. Значительное возрастание максимального теплового потока с ростом давления до 70-80 ат обеспечивает для поверхностей нагрева в паровых котлах и других промышленных аппаратах большую надежность работы, чем это имеет место при атмосферном давлении.

2. Последующее снижение q_{\max} для давления выше 80 ат, полученное в опытах, указывает на возможность значительного уменьшения q_{\max} для давлений, приближающихся к критическому, и в связи с этим на возможность перехода к пленочному режиму кипения, резко снижающему эффективность и надежность работы поверхности нагрева.

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		19

1.2. ВЛИЯНИЕ МАТЕРИАЛА ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА НА КРИВУЮ КИПЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ

Исследования кривой насыщенного кипения воды в большом объеме при атмосферном давлении для различных материалов поверхности нагрева были описаны в работе Е.В. Анохиной [8]. В качестве твэла были использованы нагреватели из меди, вольфрама и нихрома. В этой работе автор имел дело с кривыми кипения ABC, ABCHE, где точка C соответствует критической плотности теплового потока или кризису пузырькового кипения. Перед началом опытов желательно было найти ответ на вопрос – можно ли считать точку перегорания поверхности нагрева кризисом кипения, в современной литературе ответ на него не был найден.

Экспериментальная установка

В опытах использовался стеклянный сосуд установленный в песочной бане, которая нагревалась электроплитой. Рабочей жидкостью была дистиллированная вода. Нагревателем выступала металлическая проволока из меди, вольфрама, нихрома различного диаметра. Фиксирование температуры жидкости производилось ртутным термометром по Бекману. Опытный нагреватель запитывался постоянным током от батареи аккумуляторов с напряжением. С помощью переменного сопротивления (ползункового реостата) изменялся ток на экспериментальном участке. Падение напряжения фиксировалось самописцем. Тепловая нагрузка определялась по формуле:

$$q = \frac{UI}{S} = \frac{UI}{\pi dl}, \quad (1)$$

где I - ток нагрева, А; U - падение напряжения на цилиндрическом нагревателе, В; d - диаметр нагревателя, м; S - площадь нагревателя, m^2 ; l - длина нагревателя, м.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		20

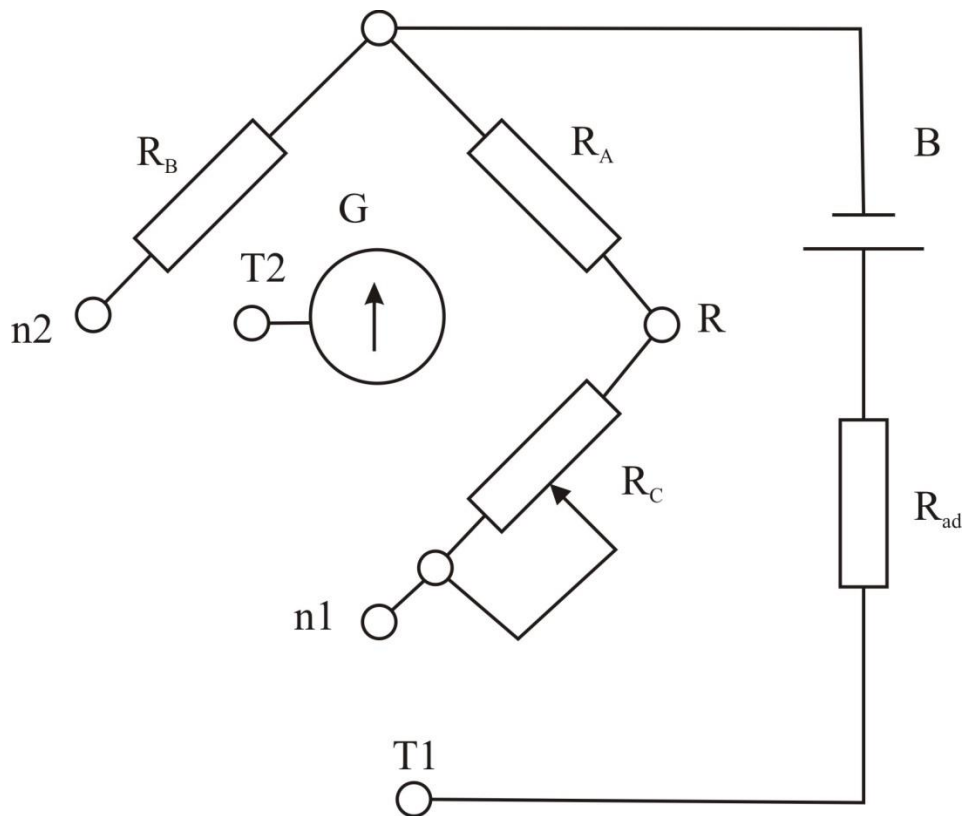


Рисунок 6 - Принципиальная электрическая схема моста [8]

Здесь R_A , R_B - плечи отношения; R_C - плечо сравнения; R_{ad} - добавочный резистор; B - батарея аккумуляторов; G - гальванометр; $T1$, $T2$ - токовые зажимы; $n1$, $n2$ - потенциальные зажимы.

Температура тепловыделяющего элемента определялась по градуированной зависимости температуры от сопротивления. На рис. 6 представлена электрическая схема измерительного моста [8], этот мост одинарный, четырехзжимная схема подключения для измерения сопротивления. Цилиндрический нагреватель подсоединяемый зажимами $T1$, $T2$, а также $n1$, $n2$. Сопротивление плеч отношения R_A , R_B составляют многие сотни Ом , а сопротивление нагревателя R_x и плеча сравнения R_C около нескольких Ом . Большая часть тока от источника идет через твэл R_x и R_C , поэтому менее 1% от общей суммы тока проходит через плечи отношения. Определить величину измеряемого сопротивления R_x можно по формуле:

$$R_x = NR_M, \quad (2)$$

где N - отношение сопротивлений плеч отношения, Ом; R_M - величина сопротивления плеча сравнения, Ом; $R_M = (R_C + R_0)$, R_0 - начальное сопротивление плеча сравнения, Ом.

Выводы

Количество тепла увеличивается с ростом температуры нагревателя.

Материал поверхности нагрева оказывает значительное влияние на форму кривой кипения. Для тепловыделяющего элемента из меди и вольфрама режима пузырькового кипения (отрезок ВС на рисунке 3) при росте тепловой нагрузки заканчивается перегоранием при низких значениях температуры, составляющих от 124 до 152 °С, и критической тепловой нагрузке, равной в среднем 1 МВт/м². А для поверхности нагрева из нихрома режим пузырькового кипения при малом увеличении плотности теплового потока резко сменяется пленочным (из точки С и Н на рисунке 3), что сопровождается большим увеличением температуры. Расплавление тепловыделяющего элемента в этом случае происходит при температуре от 1216 до 1330 °С и тепловой нагрузке 2080-2834 кВт/м² (точка Е на рисунке 3).

Кризис кипения не всегда сопровождается разрушением нагревательного элемента. Для этого необходимо знать температуру поверхности нагрева. В точке С (рисунке 3), приходящей на максимум кривой кипения, происходит локальный пережог нагревателя из медной и вольфрамовой проволоки. Для тепловыделяющих элементов из нихрома в точке Е (рисунке 3) происходит расплавление (при температуре, близкой к температуре плавления металла) нагревателя.

Для атмосферного давления при контролируемой тепловой нагрузке существует некоторое критическое значение тепловой нагрузки $q_{крит}$ для кривой кипения. Абсолютная величина $q_{крит}$ для всех размеров и материалов тепловыделяющего элемента определяется экспериментально и приходится на

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
						22
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		

интервал 779-1541 кВт/м². Этим значения соответствует температурный промежуток 124-152 °С.

1.3. КИПЕНИЕ ВОДЫ НА МИКРОСТРУКТУРИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ

В работе Ю.Ф. Гортышева, И.А. Попова и А.В. Щелчкова [9] были экспериментально исследованы теплоотдача и критические тепловые потоки на микроструктурированных поверхностях.

Экспериментальное исследование выполнялось на установке, модель которой представлена на рисунке 7 [9]. Установка представляет собой теплоизолированный сосуд в виде кипятильной камеры 1, заполненный дистиллированной водой. Внутри камеры 1 находится пластина 2, на которой изучалась интенсификация кипения. Конструкция, на которой закреплены экспериментальные пластины, образует отдельный узел установки. Нагрев экспериментальной пластины осуществляется путем непосредственного пропускания по ним электрического тока. Подвод электричества к пластине осуществляется по следующим элементам. Напряжение подавалось от клемм 3 через медные плоские токопроводы 4 к образцу 2. Все места электрического контакта при подготовке к эксперименту были зачищены. Токопроводы закреплены с помощью резьбового соединения 5 на электроизолирующей текстолитовой крышке 6. На крышке имеется бурт 7, уплотняющий крышку. Расположение экспериментальной пластины относительно крышки 6 и сосуда 1 определялось условием наилучшего обзора ее рабочей поверхности. Экспериментальная пластина 2 крепилась на поддерживающей текстолитовой пластине 15 и прижималась к токопроводам через резьбовое соединение 16.

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		23

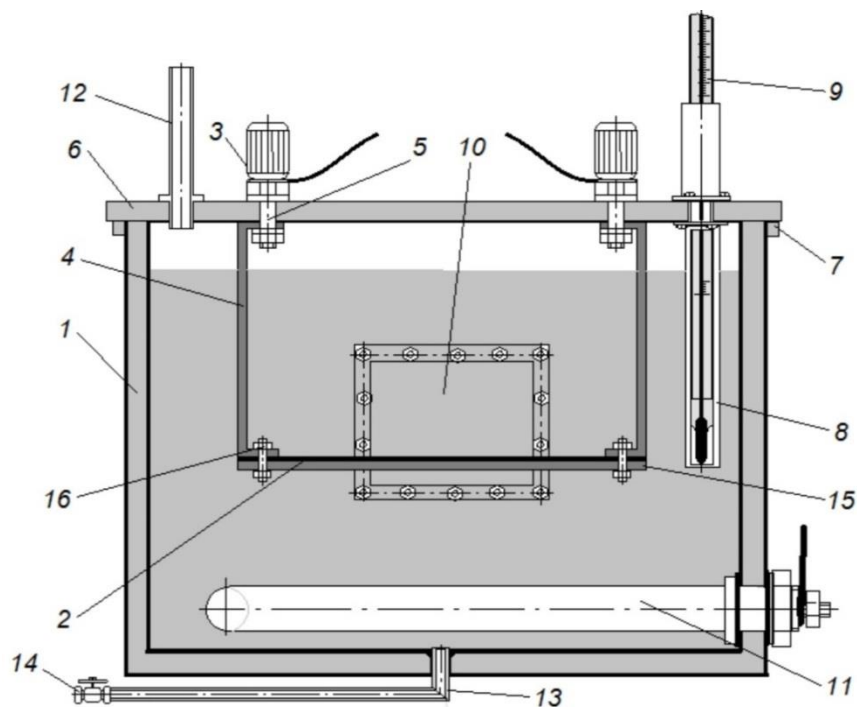


Рисунок 7 - Схема экспериментальной установки [9]

1 – кипяtilьная камера; 2 – экспериментальная пластина; 3 – клеммы; 4 – плоские тоководы; 5 – резьбовое соединение; 6 - изолирующая текстолитовая крышка; 7 – бурт; 8 – гильза; 9 – термометр; 10 – смотровое окно; 11 – ТЭН; 12 – штуцер подключения конденсатора; 13 – сливной патрубок; 14 – вентиль; 15 – текстолитовая пластина; 16 – резьбовое соединение.

На крышке закреплена гильза 8 термометра 9. При проведении эксперимента термометр 9 устанавливается в гильзу 8 так, чтобы ртутный резервуар находился на одном уровне с экспериментальной пластиной 2. Таким образом, измерялась температура воды непосредственно в зоне расположения пластины 2.

Кипяtilьная камера 1 имеет двойные стенки, между которыми имеется асбестовая теплоизолирующая набивка.

Для наблюдения за процессом кипения имеются два окна 10. Одно окно, через которое осуществляется подсветка, выполнено из матового стекла. Равномерная освещенность окна достигается с помощью полуцилиндрического зеркала на задней стенке установки. Другое окно, для наблюдения за процессом кипения, выполнено из прозрачного стекла.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

Подогрев воды до температуры кипения осуществляется с помощью ТЭНа 11. Тепловая мощность ТЭНа регулировалась во время эксперимента.

Пары воды, образующиеся при кипении, охлаждались на стенке конденсатора, подключаемого к полости камеры 1 через штуцер 12, находящийся в верхней части сосуда. Конденсат стекал обратно в камеру. Также с помощью конденсатора поддерживались условия насыщения в рабочей камере.

Заполнение водой и опорожнение камеры осуществлялось через сливной патрубок 13 в нижней части сосуда при открытом вентиле 14. Во время работы установки вентиль 14 перекрывался. Слой жидкости над экспериментальной пластиной составлял 100 мм.

Для управления параметрами нагрева воды охранным и экспериментальным нагревателями использовались следующие устройства: блок мощности и блок управления. Блок мощности представляет собой сварной каркас с установленными на передней панели автотрансформаторами для регулировки напряжения на экспериментальном нагревателе и охранным ТЭНе, два выключателя для включения и выключения напряжения нагрева экспериментального нагревателя и охранным ТЭНа, амперметры для контроля силы тока при нагреве образца, ваттметр для определения тепловыделения на образце и милливольтметр для измерения термо-ЭДС хромель-копелевых термопар на поверхности образца и арматура сигнальная.

Температура воды t_f в ходе эксперимента определялась с помощью ртутного термометра со шкалой от 50 до 100 $^{\circ}\text{C}$ и ценой деления 0,1 $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент теплоотдачи рассчитывался по формуле:

$$\alpha = \frac{Q}{(F\Delta t)}, \quad (3)$$

где α - коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}$; F-площадь поверхности пластины, на которую нанесены ребра, м^2 ; $Q = I\Delta U$ - тепловой поток, выделяющийся на

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		25

пластине, $Вт$; $\Delta t = t_w - t_f$ - разность между средней температурой поверхности образца и воды, $К$; ΔU - падение напряжения на пластине, I - сила тока, подаваемого на пластину.

Объекты исследований

Геометрическая форма образца и оребренные методом деформирующего резания (ДР) поверхности различной конфигурации показаны на рисунке 8 и рисунке 9 [9]. Исследования проводились на образцах из различных материалов толщиной от 0,2 до 0,5 мм, длиной рабочей части (оребренной) 115 мм и шириной 5 мм. Длина образца выбрана так, чтобы обеспечивался свободный обзор поверхности кипения через смотровое окно. Ширина и толщина рабочего участка были выбраны из условия получения необходимых тепловых потоков на поверхности теплообмена. В местах контакта образца с токопроводящими шинами площадь соответствующей грани образца увеличена с целью обеспечения надежного электрического контакта и минимального отвода тепла в этих местах на токоведущие шины. На прямом узком участке образца наносился микрорельеф.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		26

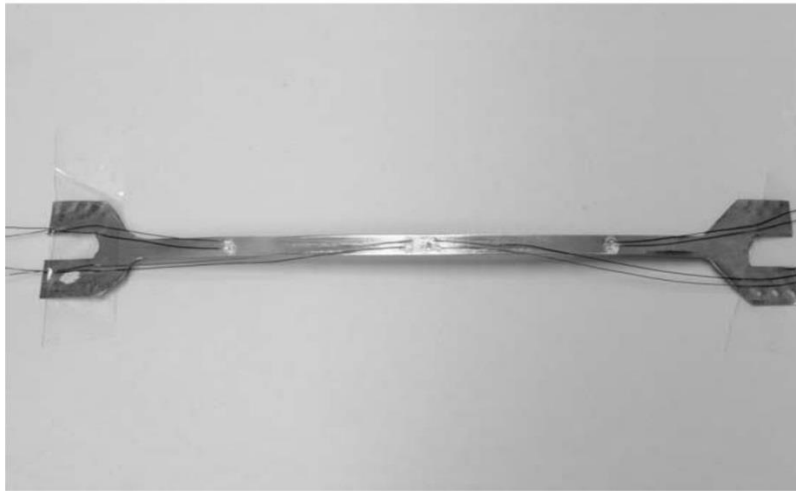
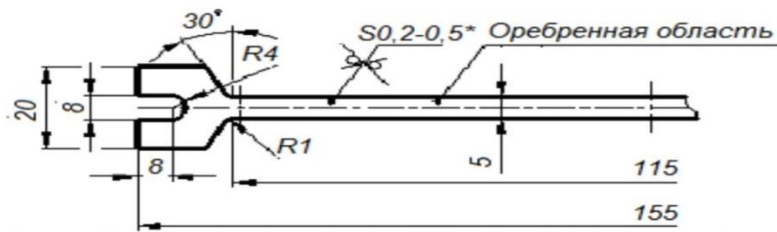


Рисунок 8 - Геометрическая форма образца, расположение оребренной зоны и термопар [9]

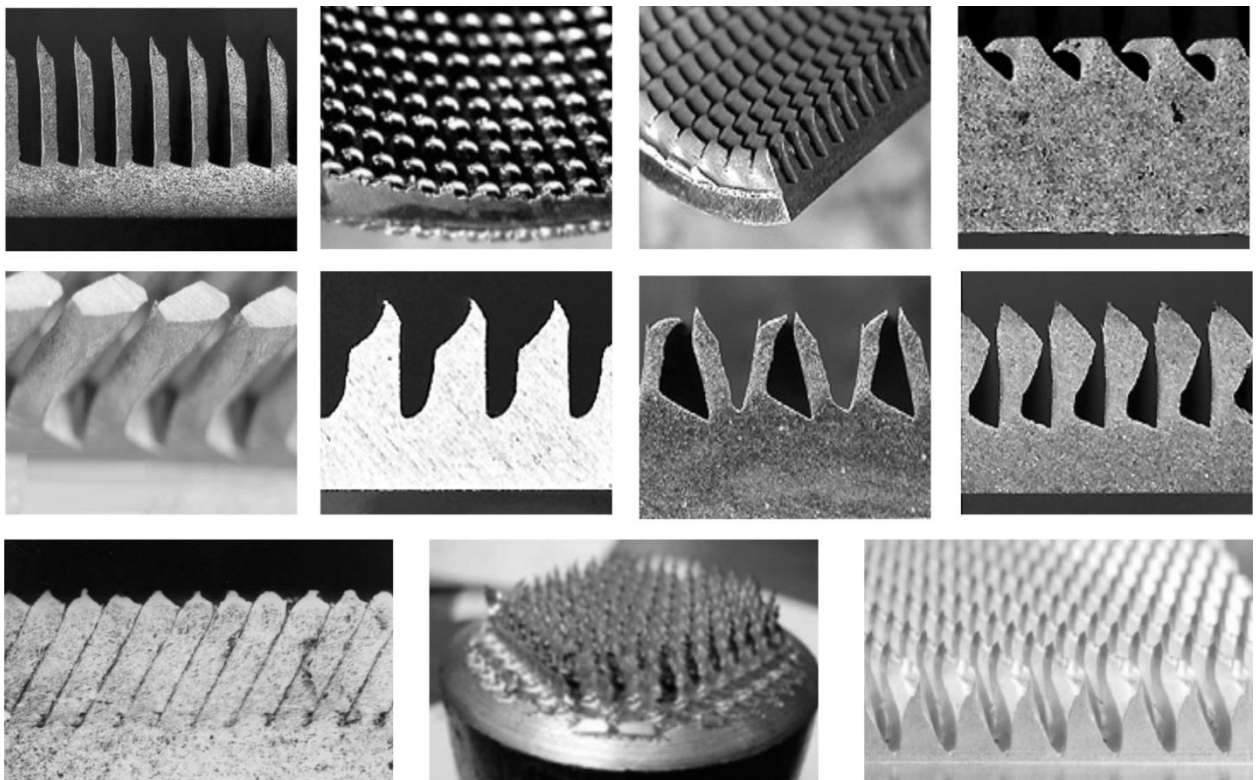


Рисунок 9 - Оребренные методом ДР поверхности различной конфигурации [9]

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ

Лист

27

Заготовкой для изготовления оребренных пластин служили листы титанового сплава BT1, нержавеющей стали X18H9T и 12X18H10T и углеродистой стали AISI 1020.

Температура поверхности образца измерялась с помощью четырех хромель-копелевых термопар. Спаи двух термопар находились вблизи поперечной оси симметрии образца на расстоянии друг от друга 10 мм. Спаи двух крайних термопар находились на расстоянии 40 мм от краев образца. Каждый королек термопары был приварен к поверхности образца. Свободные концы были выведены через отверстие в крышке сосуда.

Результаты исследований

В ходе экспериментов также было отмечено, что при долговременной работе экспериментальных пластин, периодическое вскипание жидкости на их поверхности происходит изменение интенсивности теплоотдачи. Идет, так называемая «приработка» поверхности. Все результаты получены на «прикипевших» пластинах.

Проведенные эксперименты показали, что применение поверхностей с рельефом, полученным с помощью метода деформирующего резания, позволяет значительно повысить интенсивность теплообмена при кипении по сравнению с гладкими образцами. Также обнаружено, что интенсивность теплообмена возрастает с уменьшением характерных размеров элементов микрорельефа.

На основе результатов, сделана попытка проанализировать влияние ширины межреберного зазора на теплоотдачу. При увеличении зазора между ребрами уменьшается уровень интенсификации теплоотдачи. Можно отметить, что увеличение интенсивности теплообмена в основном обусловлено не увеличением площади теплообмена. Можно отметить, что увеличение угла наклона ребер к основной поверхности будет способствовать увеличению коэффициента теплоотдачи.

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		28

Установлены критические тепловые потоки в зависимости от геометрии интенсифицированных поверхностей. В результате экспериментов сделан вывод, что с увеличением относительной высоты микроребер возрастают и критические тепловые потоки.

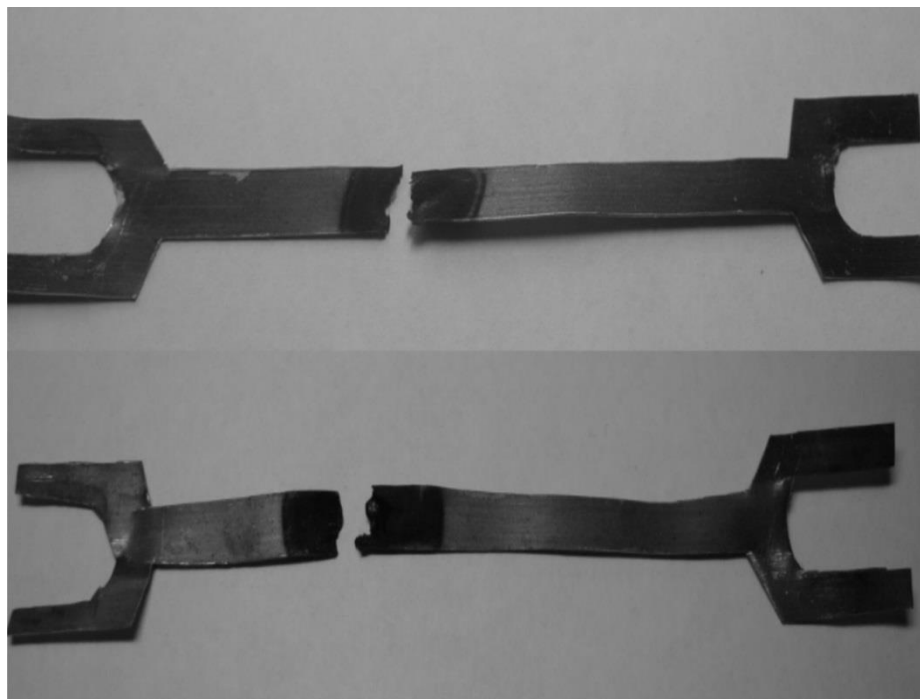


Рисунок 10 - Экспериментальные пластины после кризиса кипения [9]

Кризис кипения фиксировался по характерному резкому повышению температуры поверхности, сопровождающемуся свечением поверхности и прогару поверхности (рисунок 10) [9].

Выводы

В ходе проведения исследования показано, что теплообменные поверхности, полученные новым ресурсосберегающим методом формирования поверхностей, в виде двух- и трехмерных микроорребренных поверхностей и канальных структур позволяют существенно повышать теплоотдачу и критические тепловые потоки при кипении жидкостей. Наибольшая интенсификация теплоотдачи свойственна поверхностям с трехмерными столбчатыми и канальными структурами – с 3 до 9 раз. Для двухмерных микроребер интенсификация теплообмена составляет до 2,5 раз. При этом уменьшение межреберного расстояния и увеличение угла наклона увеличивают

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

интенсивность теплообмена. Увеличение критической плотности теплового потока ($q_{крит}$) составило 4,1 раз.

1.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРТЕРИАЛЬНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

В настоящее время в технике широко используются артериальные тепловые трубы. Преимуществами артериального фитиля являются низкие значения гидравлического сопротивления движению жидкости и радиального термического сопротивления фитиля при достаточно высоких значениях величины располагаемого капиллярного напора. Разделение жидкостных каналов и участков теплообмена при размещении артерий в паровом канале существенно снижает вероятность образования в них пузырей. Однако реализация положительных свойств артериальных тепловых труб возможна только при тщательной обработке их конструкции и технологии изготовления. Особенно это относится к исследованиям артериальных труб со щелочными металлами.

В работе Я.М. Баума, С.С. Юрова, И.П. Богуша, Г.А. Зарицкого [12] были проведены экспериментальные исследования артериальных тепловых труб, артерии которых вынесены в паровой канал и соединены с раздаточным фитилем с помощью ножек, причем, согласно разработанной авторами технологии, все элементы (артерия, ножка артерии, раздаточный фитиль) выполняются из одной сетчатой заготовки.

В [13, 14] приведены характеристики тепловых труб, у которых артерии, вынесенные в паровой канал, и раздаточный фильтр, примыкающий к внутренней стенке корпуса, изготовлены отдельно из нескольких спеченных слоев мелкоячеистой сетки. Четыре артерии расположены внутри раздаточного фитиля попарно и диаметрально противоположно, как показано на рисунке 11, а [12]. Рентгенографирование показало, что на отдельных участках были

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		30

обнаружены существенные отслоения артерий от раздаточного фитиля. Поэтому экспериментальные характеристики тепловых труб, заправленных натрием, довольно значительно отличались от расчетных. Обнаружено, что положение артерий в поле гравитационных сил при горизонтальном положении тепловой трубы заметно влияет на ее характеристики [14].

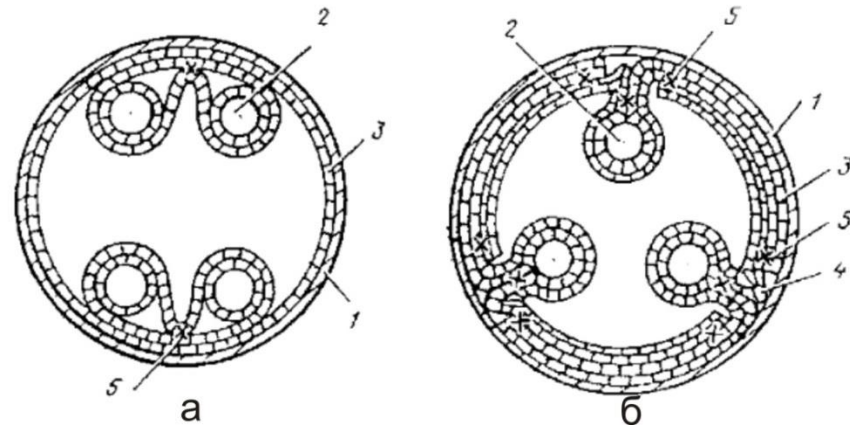


Рисунок 11 - Схемы конструкций артериальных труб (а – из [13, 14], б – со сборным фитилем [12])

1 – корпус; 2 – артерия; 3 – раздаточный фитиль; 4 – ножка артерии; 5 – место сварки.

Для своих экспериментов, они изготовили несколько вариантов конструкции артериального фитиля с одной, двумя, тремя и четырьмя артериями. Схема последнего варианта, имеющего три или четыре артерии из двух слоев сетки, показана на рисунке 11, б [12]. Число слоев сетки в раздаточном фильтре и ножке артерии увеличено с целью снижения их гидравлического сопротивления.

Испытания тепловых труб проводились на воздухе в условиях естественной конвекции, а также в вакууме. Диапазон температурных режимов испытаний 673-973 К, диапазон изменения углов наклона продольной оси тепловой трубы к горизонту в процессе испытаний – $(+90^0) - (-90^0)$. За отрицательный принят угол наклона, при котором зона испарения расположена выше зоны конденсации.

Экспериментальная установка

Подвод тепла к трубе осуществлялся от медного нагревателя-термобуфера, в котором фиксируется зона испарения. Вся остальная часть тепловой трубы является зоной конденсации и помещается в коаксиальный холодильник-калориметр, охлаждаемый водой, по подогреву и расходу которой определяется переносимая трубой мощность.

Температура тепловой трубы измерялась с помощью хромель-алюмелевых термопар, которые крепились к корпусу с помощью контактной электросварки.

Тепловая труба с нагревателем и холодильником монтируется на поворотной раме, которая позволяет изменять угол наклона продольной оси трубы к горизонту и фиксировать требуемое значение.

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что жидкометаллические артериальные тепловые трубы, изготовленные по разработанной авторами технологии, успешно работают при произвольной ориентации в пространстве относительно направления действия гравитационных сил в условиях естественной атмосферы и вакуума, а также с неконденсирующимся газом и в специфических условиях мощного локального теплоотвода и вибронагрузок. Характеристики артериальных тепловых труб во всех случаях стабильны, образование пузырей в артериях не обнаружено.

1.5. ЭКСПЕРИМЕНТЫ С ДВУХ ЖИДКОСТНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБОЙ

Большой интерес представляют тепловые трубы, работающие на смеси жидкостей. Целью экспериментальной работы Фелдмана и Битлова [17] было изучение характеристик тепловой трубы, работающей на смеси метилового спирта с водой.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		32

Экспериментальная установка

Исследования проводились с тепловой трубой обычной конструкции. Для измерения тепловой мощности применялся калориметр, состоящий из электрического нагревателя и водяного холодильника. Нагреватель наматывался в виде спирали вокруг трубы и теплоизолировался от окружающей среды двумя слоями асбестовой ткани. Водяной проточный холодильник представлял собой трубу из оргстекла. Охлаждающая вода подавалась в холодильник при температуре окружающей среды, чтобы свести к минимуму тепловые потери. Тепловая мощность на трубе определялась по подъему температуры и расходу воды через калориметр. Разность температур измерялась при помощи двух термопар, расположенных на входном и выходном патрубках холодильника, и контролировалась по показаниям двух ртутных термометров, установленных на входном и выходном резервуарах. Мощность, подводимая к электрическому нагревателю, регулировалась посредством вариатора и измерялась ваттметром с учётом коэффициента мощности. Никаких специальных мер для устранения тепловых потерь от нагревателя в окружающую среду не предпринималось. Общий вид экспериментальной установки в сборке показан на рисунке 14 [17].

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		33

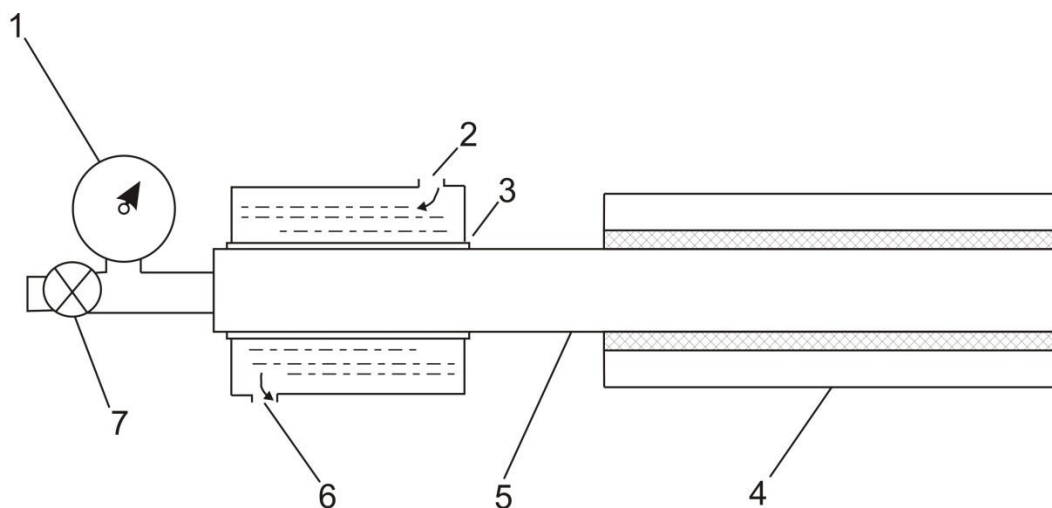


Рисунок 14 - Тепловая труба с калориметром [17]

1 – мановакуумметр; 2 – входной патрубок; 3 – труба из оргстекла; 4 – изолированный электронагреватель; 5 – тепловая труба; 6 – выходной патрубок; 7 – штуцер для заполнения.

На рисунке 15 [17] показан принцип работы двухжидкостной тепловой трубы. Было исследовано пять рабочих смесей следующих составов: 100% спирта, 75% спирта и 25% воды, 50% спирта и 50% воды, 25% спирта и 75% воды, 100% воды. Все исследования выполнялись на одной и той же тепловой трубе.

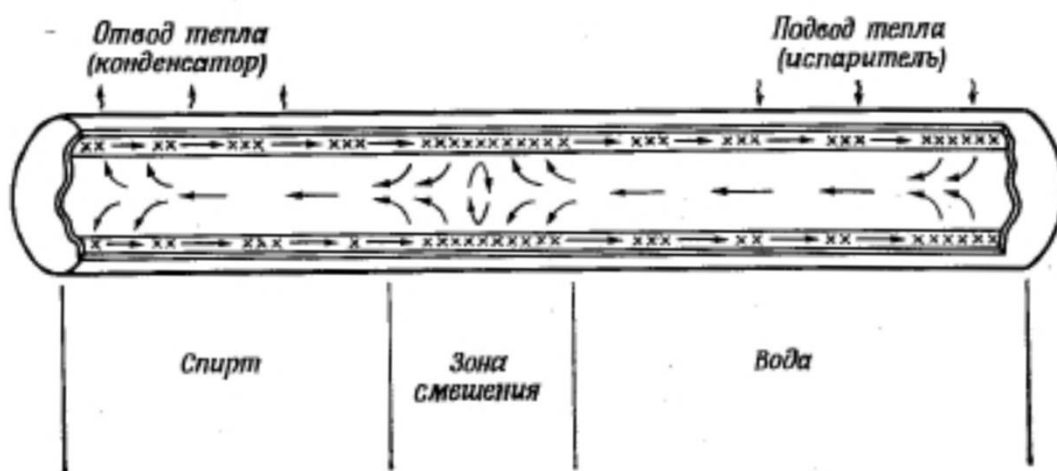


Рисунок 15 - Принцип работы двухжидкостной тепловой трубы [17]

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

Выводы

Экспериментальные исследования показывают, что двухжидкостная тепловая труба при равном объеме содержания воды и метилового спирта не является изотермической, незначительно изменяет свою характеристику при различных нагрузках, а по передаваемой мощности не превосходит обычную одножидкостную тепловую трубу. Однако при использовании рабочей смеси иного состава характеристика тепловой трубы может быть существенно улучшена. Отличная характеристика тепловой трубы на смеси 25% спирта и 75% воды показывает, насколько эффективным является добавление к основной рабочей жидкости малого количества легкокипящего компонента. Вода является достаточно удобной рабочей жидкостью прежде всего потому, что она имеет относительно высокие значения теплоты парообразования и поверхностного натяжения, но упругость ее пара в испытанном диапазоне температур мала. Давление водяного пара и его плотность существенно увеличиваются при использовании рабочей смеси указанного состава, что приводит к улучшению характеристики тепловой трубы. Такая тепловая труба более изотермична, ее практический температурный диапазон шире, чем у тепловых труб, использующих в качестве рабочей жидкости чистые воду и метиловый спирт.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		35

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ

2.1. ТЕОРИЯ МЕТОДА

Кипением называется процесс образования пара внутри объема жидкости. Условия протекания этого процесса своеобразны и сложны.

Для возникновения кипения всегда необходим некоторый перегрев жидкости, т.е. превышение температуры жидкости $t_{ж}$ над температурой насыщения t_s при заданном давлении p . Этот перегрев, как показывают опыты, зависит от физических свойств жидкости, ее чистоты, давления, а также свойств граничных твердых поверхностей. В случае теплообмена при кипении движущим потенциалом для теплового потока является разность между температурой поверхности t_n и температурой насыщения t_s при заданном давлении в жидкости p . Это и есть главное отличие от конвективного теплообмена однофазной жидкости, при котором плотность теплового потока зависит от разности температур между поверхностью и объемом жидкости. При погружении подогреваемой поверхности в неподвижную жидкость, процесс кипения называется кипением в большом объеме. Если температура жидкости $t_{ж}$ ниже температуры t_s , то этот процесс называется кипением с подогревом. Когда жидкость находится при температуре насыщения t_s , такой процесс известен как кипение насыщенной жидкости.

Если рассмотреть модель процесса теплоотдачи при пузырьковом кипении смачивающей неметаллической жидкости в большом объеме, основанную на анализе работы одного центра парообразования. Тепло от поверхности нагрева передается к жидкости, которая перегревается и испаряется в пузырь пара, который увеличивает свои размеры, затем отрывается, всплывает и при подъеме продолжает расти (рисунок 16) [18].

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		36

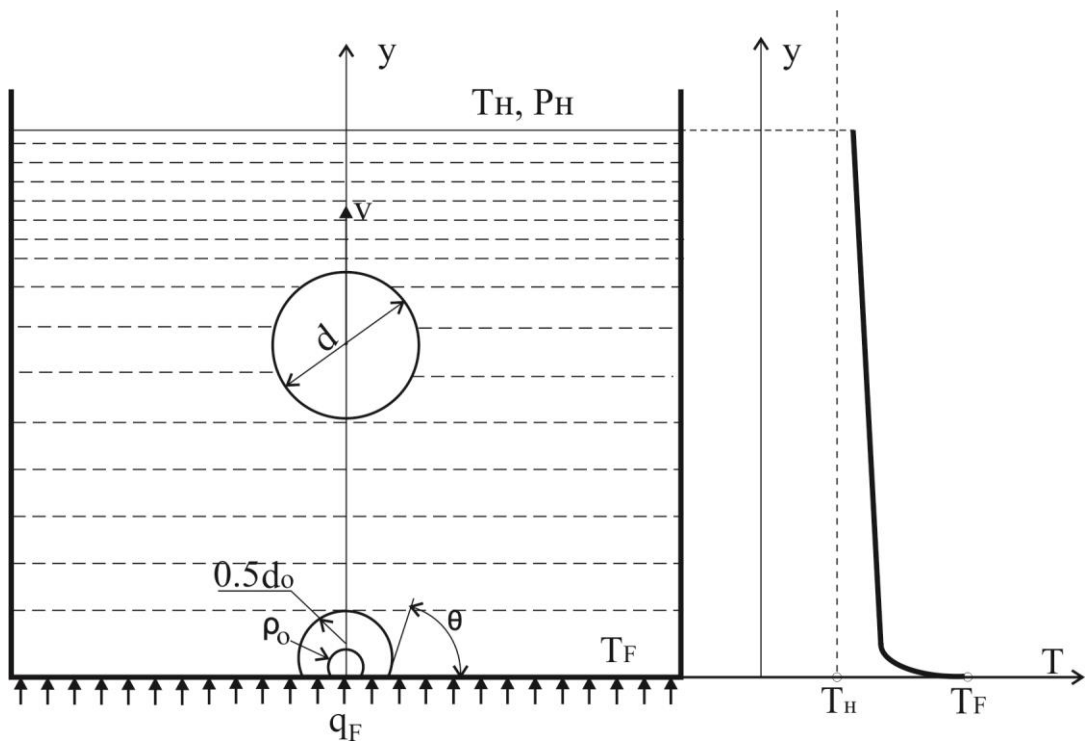


Рисунок 16 - Образование и отрыв пузыря пара при наличии одного центра парообразования [18]

Тогда количество тепла при действии на поверхности одного центра парообразования за период времени τ_0 между отрывом пузырьков определяется уравнением [19]:

$$Q = \int_{\tau}^{\tau+\tau_0} d\tau \int_F -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial y} \right)_{y=0} dF, \quad (4)$$

где t – температура жидкости в точке, имеющей координаты x, y, z в момент времени τ (ось y направлена вверх по нормали к поверхности); λ – коэффициент теплопроводности жидкости; dF – элемент поверхности нагрева.

Таким образом, для определения Q необходимо знать температурное поле в жидкой фазе вблизи стенки. Температурное поле в однофазной жидкости, как известно, описывается уравнениями Фурье-Кирхгофа, Навье-Стокса и неразрывности, имеющими в векторной форме вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + (\vec{\omega}, \text{grad}t) = a \nabla^2 t, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{\omega}}{\partial \tau} + (\vec{\omega}, \text{grad}) \vec{\omega} = -\frac{1}{\rho_1} \text{grad} P + \nu \nabla^2 \vec{\omega}, \quad (6)$$

$$\text{div} \vec{\omega} = 0, \quad (7)$$

где $\vec{\omega}$ – скорость жидкости; $P = p - \gamma_1 y$ – динамическое давление в жидкости (p – полное давление); a, ν, ρ_1 и γ_1 – температуропроводность, кинематическая вязкость, плотность и удельный вес жидкости.

Физические параметры считаются независимыми от температуры.

Теперь необходимо сформулировать условия однозначности, учитывающие особенности протекания процесса теплообмена в жидкой фазе при кипении жидкости.

Скорость жидкости на поверхности пузыря пара после отрыва, очевидно, равна скорости подъема пузыря (\vec{v}). Эту скорость можно определить из уравнения движения пузыря. Наблюдения показывают, что скорость подъема пузыря приблизительно постоянна во времени. Поэтому уравнение движения пузыря можно записать в следующей простой форме:

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho_1 - \rho_2) \vec{g} + C \frac{\pi d^2}{4} \rho_1 \frac{u \vec{u}}{2} = 0, \quad (8)$$

где d – эквивалентный диаметр пузыря; ρ_2 – плотность пара в пузыре; \vec{g} – ускорение силы тяжести; C – коэффициент сопротивления пузыря; \vec{u} – относительная скорость пузыря.

$$\vec{u} = \vec{v} - \vec{\omega}, \quad (9)$$

где \vec{v} – скорость подъема пузыря.

т.е. сумма подъемной силы и силы сопротивления равна нулю.

Другое крайнее условие можно получить, написав выражение для потока тепла на поверхности пузыря. Тепло, подведенное к пузырю, затрачивается на испарение жидкости внутрь пузыря, что сопровождается ростом его объема. Поэтому имеем следующее соотношение, называемое уравнением роста пузыря:

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		38

$$\int_s -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} ds = r\gamma_2 \frac{\pi d(d^3)}{6 d\tau}, \quad (10)$$

где n – нормаль к поверхности пузыря s ; r и γ_2 – теплота парообразования и удельный вес пара в пузыре.

Краевые условия, задающие температуры на границах системы:

$$t_{y=0} = t_c; \quad t_{n=0} = t_n; \quad t_{y=h} = t_n, \quad (11)$$

где h – уровень жидкости над поверхностью нагрева.

Начальные условия не задаются, так как предполагается, что процесс продолжается столь долго, что начальное распределение температур потеряло свое влияние на ход процесса.

Для приведения уравнений (8) ÷ (10) к безразмерному виду, выберем в качестве масштаба для линейных размеров и координат диаметр пузыря в момент отрыва d_0 . Величина d_0 является единственным характерным размером. Она всегда может быть вычислена, если известны физические параметры жидкости. При действии на поверхности одного центра парообразования

$$d_0 = 0,02\Theta \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma_1 - \gamma_2}}, \quad (12)$$

где Θ – краевой угол.

Температуру будем отсчитывать от температуры насыщения t_n , а в качестве масштаба для нее выберем $\Delta t = t_c - t_n$.

Для безразмерных величин введем следующие обозначения:

$$X = \frac{x}{d_0}; \quad \dots D = \frac{d}{d_0}; \quad S = \frac{s}{d_0^2}; \quad \dots T = \frac{t - t_n}{t_c - t_n}. \quad (13)$$

При помощи принятых масштабов выразим в уравнениях (12)÷(13) соответствующие величины через безразмерные.

$$\frac{\partial T}{\partial \left(\frac{a\tau}{d_0^2} \right)} + \frac{\nu}{a} \left(\frac{\bar{\omega}d_0}{\nu} \right) grad T = \nabla^2 T, \quad (14)$$

$$\frac{a}{\nu} \cdot \frac{\partial \left(\frac{\bar{\omega}d_0}{\nu} \right)}{\partial \left(\frac{a\tau}{d_0^2} \right)} + \left(\frac{\bar{\omega}d_0}{\nu}, grad \right) \frac{\bar{\omega}d_0}{\nu} = -grad \frac{Pd_0^2}{\rho_1 \nu^2} + \nabla^2 \frac{\bar{\omega}d_0}{\nu}, \quad (15)$$

$$div \left(\frac{\bar{\omega}d_0}{\nu} \right) = 0, \quad (16)$$

$$\frac{gd_0^3(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1 \nu^2} \cdot \frac{\pi D^3}{6} + \frac{C\pi D^2}{8} \cdot \left(\frac{ud_0}{\nu} \right) \cdot \left(\frac{\bar{u}d_0}{\nu} \right) = 0, \quad (17)$$

$$T_{y=0} = 1, \quad T_{N=0} = 0, \quad T_{Y=H} = 0, \quad (18)$$

$$\frac{\gamma_1 e \Delta t}{\gamma_2 r} \int_s \left(\frac{\partial T}{\partial N} \right)_{N=0} dS = \frac{\pi}{6} \cdot \frac{d(D^3)}{d \left(\frac{a\tau}{d_0^2} \right)}. \quad (19)$$

Из уравнений (15)-(19) видно, что безразмерная температура T может быть выражена уравнением вида:

$$T = f \left(\frac{a\tau}{d_0^2}, \frac{x}{d_0}, \frac{y}{d_0}, \frac{z}{d_0}, \frac{\nu}{a}, \frac{gd_0^3(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1 \nu^2}, \frac{\gamma_1 c \Delta t}{\gamma_2 r} \right). \quad (20)$$

Если допустить, что центры парообразования не влияют друг на друга в тепловом и гидродинамическом отношениях, то при действии на поверхности m центров коэффициент теплоотдачи от стенки к жидкости будет равен:

$$a = \frac{mQ'}{\tau_0 F \Delta t}. \quad (21)$$

Выразив и приведя к безразмерному виду количество тепла Q из формулы (21) получим:

$$\frac{ad_0}{\lambda} = m \frac{d_0^2}{a\tau_0} \int_0^{\frac{a\tau_0}{d_0^2}} d \left(\frac{a\tau}{d_0^2} \right) \frac{d_0^2}{F} \int_{d_0^2} - \left(\frac{\partial T}{\partial Y} \right)_{Y=0} d \left(\frac{F}{d_0^2} \right). \quad (22)$$

Подставляя в это уравнение безразмерную температуру T из уравнения (20), имеем:

$$\frac{ad_0}{\lambda} = mf_2 \left(\frac{\nu}{a}, \frac{gd_0^3(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1 \nu^2}, \frac{\gamma_1 c \Delta t}{\gamma_2 r} \right). \quad (23)$$

Практически наиболее интересен случай, когда на поверхности действует большое число центров парообразования и, следовательно, невозможно пренебрегать их влиянием друг на друга. Чтобы учесть это влияние, уравнение (23) необходимо переписать в виде:

$$\frac{ad_0}{\lambda} = \varphi_1(m) f_2 \left(\frac{\nu}{a}, \frac{gd_0^3(\gamma_1 - \gamma_2)}{\gamma_1 \nu^2}, \frac{\gamma_1 c \Delta t}{\gamma_2 r} \right). \quad (24)$$

2.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Установка (рисунок 17) представляет из себя стальную камеру, состоящую из корпуса камеры 2 и крышки камеры 4.

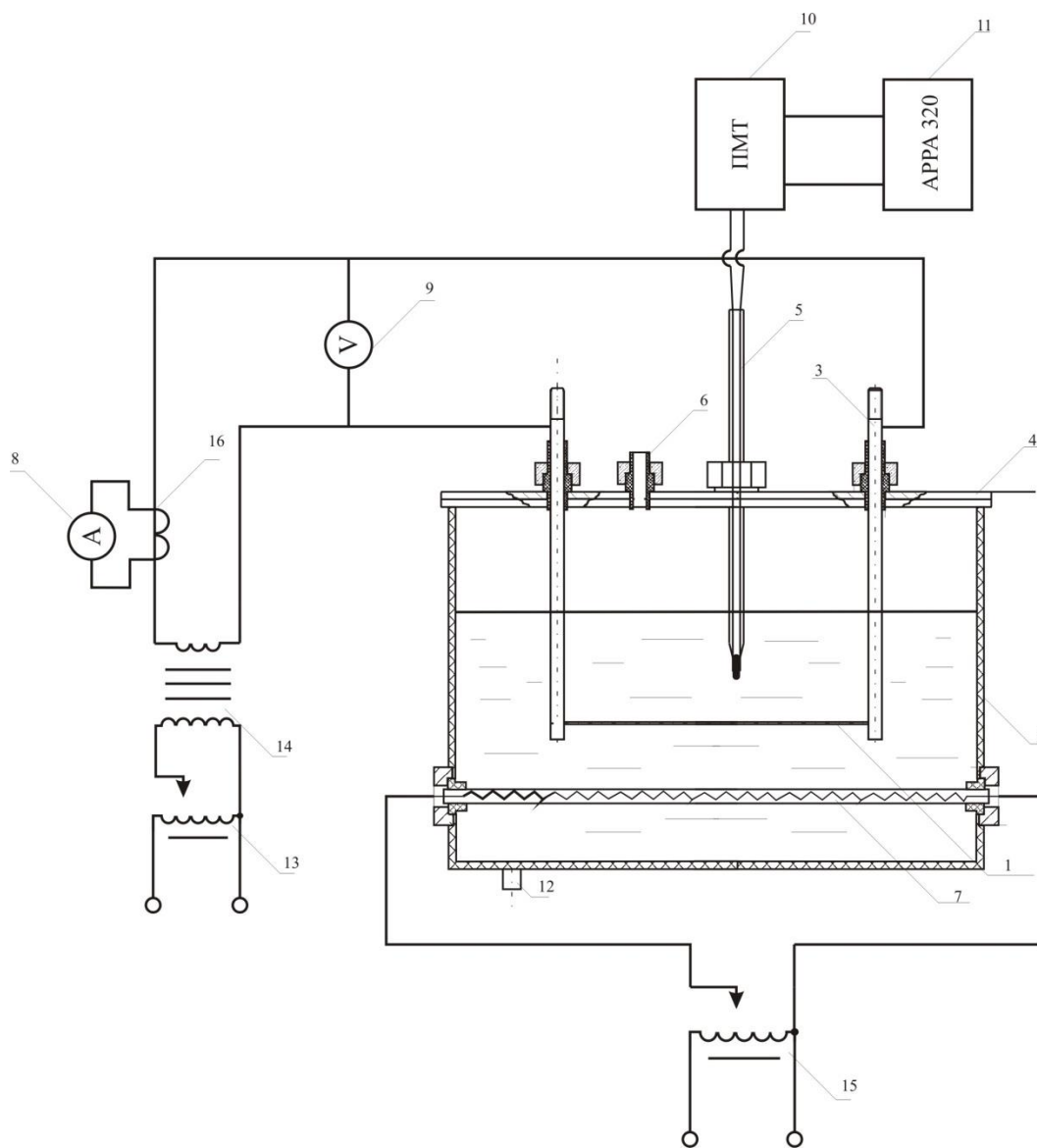


Рисунок 17 - Принципиальная схема экспериментальной установки

1 – испытательная нить (проволока); 2 – корпус камеры; 3 – токовод; 4 – крышка камеры; 5 – хромель-копелевая термопара; 6 – термопарный вывод; 7 – нагреватель; 8 – амперметр; 9 – вольтметр; 10 – переключатель термопар; 11 – мультиметр; 12 – штуцер для слива воды; 13 – регулятор напряжения; 14 – понижающий силовой трансформатор; 15 – регулятор напряжения нагревателя; 16 – трансформатор тока.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ

Лист

42

В крышке камеры 4 имеются отверстия под тоководы 3, хромель-копелевую термопару 5 для измерения температуры жидкости и для вывода термопар 6. Тоководы закрепляются на крышке. Опытная труба крепится к тоководам 3 и помещается внутри стальной камеры 2 заполненной жидкостью, которая нагревается нагревателем 7. По трубе пропускается электрический ток. Ток в опытную трубу подается от электрического трансформатора по тоководам. Потребляемая мощность регулируется с помощью регулятора напряжения 13 типа РНО 250-2. Мощность определяется по электрическому току и падению напряжения на опытной трубе. Падение напряжения и сила тока (через трансформатор тока) измеряются амперметром 8 и вольтметром 9. Температура испытательной трубки измеряется с помощью хромель-копелевой термопары. Термопары соединены с переключателем термопар 10 типа ПМТ. ЭДС термопар измеряется цифровым вольтметром 11 типа АРРА 320. На днище камеры расположен штуцер 12 для слива воды.

На рисунке 18 представлена конструкция камеры кипения. Корпус камеры 9 изготовлен из стали. Для уменьшения теплопотерь через стальной корпус камеры используется теплоизоляция 14 типа тепофол, обладающий малой теплопроводностью. Крышка камеры 8 так же изготовлена из стали и поверх проложен тепофол. В крышке имеются отверстия для вывода термопар 4, тоководы 2, хромель-копелевая термопара 5 для измерения температуры жидкости. Для наблюдения за режимом кипения в корпусе камеры предусмотрены смотровые окна 6 из оргстекла, оно также обладает малой теплопроводностью для обеспечения теплоизоляции. Которые прижимаются накидным фланцем 7.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		43

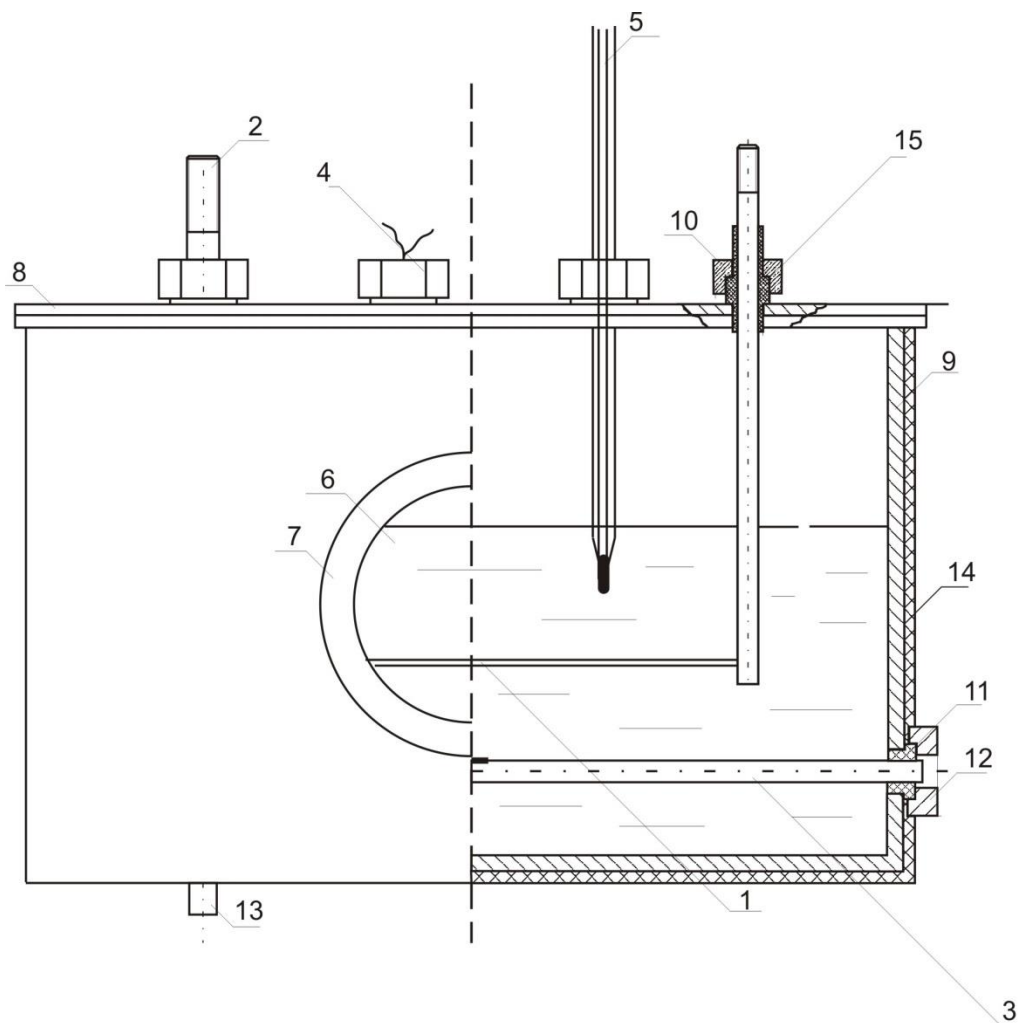


Рисунок 18 - Конструкция камеры кипения

1 – опытная нить (проволока); 2 – токовод; 3 – нагреватель; 4 – термопарный вывод; 5 – термопара хромель-копелевая; 6 – смотровое окно; 7 – накидной фланец; 8 – изоляция; 9 – корпус камеры; 10 – фторопластовая втулка; 11 – накидная гайка; 12 – фторопластовая втулка; 13 – штуцер слива воды; 14 – теплоизоляция; 15 – накидная гайка.

Токовод пропускается через фторопластовую втулку 12, которая служит как электроизолятор и уплотнитель, сверху накидывается накидная гайка 10 и прижимается. К тоководам болтом крепится испытательная нить (проволока) 1. Испытательная нить помещается внутри камеры в жидкость. Теплообмен между опытной нитью и кипящей жидкостью происходит при атмосферном давлении. В нижней части камеры имеется штуцер 13 для слива воды.

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ

Лист

44

Нагреватель 3 уплотняется и изолируется фторопластовой втулкой 12, все это соединение фиксируется накладной гайкой 11.

2.3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для каждого опыта с нитью определили и занесли в таблицу следующие величины.

1. Средний коэффициент теплоотдачи между нитью и кипящей жидкостью определяем из соотношения:

$$\alpha = \frac{q_f}{\Delta t} = \frac{Q}{F(t_n - t_{жс})} \text{ Вт} / \text{м}^2 \text{К}, \quad (25)$$

где q_f - плотность теплового потока, $\text{Вт} / \text{м}^2$; Δt - температурный напор между нитью и жидкостью, $^{\circ}\text{C}$; F - площадь поверхности теплообмена, м^2 ; Q - тепловой поток, Вт ; t_c - температура трубки, $^{\circ}\text{C}$; t_n - температура жидкости, $^{\circ}\text{C}$.

2. Площадь поверхности нагрева:

$$F = \pi dl \text{ м}^2, \quad (26)$$

где d - диаметр нити, мм ; l - длина нити, м .

3. Плотность теплового потока:

$$q_f = \frac{Q}{F} \text{ Вт} / \text{м}^2. \quad (27)$$

4. Тепловой поток определяется по мощности, выделяемой нитью:

$$Q = I_n U_n \text{ Вт}, \quad (28)$$

где I_n - ток проходящий через нить, А ; U_n - напряжение проходящее через нить, В ;

5. Температурный напор между проволокой и жидкостью:

$$\Delta t = t_n - t_{жс} \text{ } ^{\circ}\text{C}. \quad (29)$$

6. Температура нити определяется из выражения:

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		45

$$R_n = R_0(1 + K_i(t_n + 20)), \quad (30)$$

$$t_n = \frac{\frac{R_n}{R_0} - 1}{K_i} + 20 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (31)$$

где R_n - сопротивление нагревателя, Ом; R_0 - сопротивление нити при 20°C , Ом; K_i - температурный коэффициент сопротивления, $1/\text{K}$.

7. Ток через нить:

$$I_n = U_k / r, \text{ A}, \quad (32)$$

где U_k - напряжение проходящее через катушку, В; $r = 0,001$ - сопротивление катушки, Ом.

8. Сопротивление нити:

$$R_n = \frac{U_n}{I_n}, \text{ Ом}, \quad (33)$$

9. Расчет погрешности погрешности измерений:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{\Delta Q}{Q} + \frac{\Delta t_{жс} + \Delta t_n}{t_{жс} + t_n} + \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta l}{l}, \quad (34)$$

где $\Delta\alpha, \Delta Q, \Delta t_c, \Delta t_n, \Delta d$ - абсолютные погрешности измерения.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЙ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

3.1. ТЕОРИЯ МЕТОДА ДЛЯ ТИПИЧНЫХ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

При решении этой задачи стержень предполагается настолько тонким, что температура во всех его точках поперечного сечения можно считать одинаковой. Задача, таким образом, сводится к задаче линейного теплового потока, в котором температура определяется только временем и расстоянием, измеренным вдоль оси стержня. Предполагается также, что конечный элемент стержня отдает в результате теплообмена тепло. Эта задача относится к типу задач с источником. Если считать, что теплообмен между стержнем и окружающей средой происходит по закону Ньютона, то

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{dx^2} - v(T - T_c), \quad (51)$$

$$v = \frac{aP}{c\rho S}, \quad (52)$$

где a - коэффициент теплообмена; P - периметр стержня; c - удельная теплоемкость; ρ - плотность.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{dx^2} - vT. \quad (53)$$

В случае установившейся температуры формула переходит в следующее выражение:

$$a \frac{\partial^2 T}{dx^2} - vT = 0. \quad (54)$$

Граничные условия:

$$\begin{bmatrix} T_{x=0} = T_1 \\ T_{x=l} = T_2 \end{bmatrix} \quad (55)$$

Решая уравнение (46) с граничными условиями (47), можно получить выражение для коэффициента теплообмена:

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		47

$$a = \frac{\lambda}{l} \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (56)$$

где l - длина стержня; λ - коэффициент теплопроводности.

3.2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Основными элементами экспериментальной установки (рисунок 23) являются укрепленная на штативе тепловая труба 1. На нижнем конце трубы установлен электрический нагреватель 2 (для подвода теплоты в зону испарения), на который подается электрическое напряжение от лабораторного блока питания 3. Также на трубу устанавливаются датчики температуры 8. Труба соединена с холодильником 6, который в свою очередь соединен с насосом 7, а также с резервуаром 11. Датчик температуры 9 и прибор АРРА 320 10 также подключены к системе.

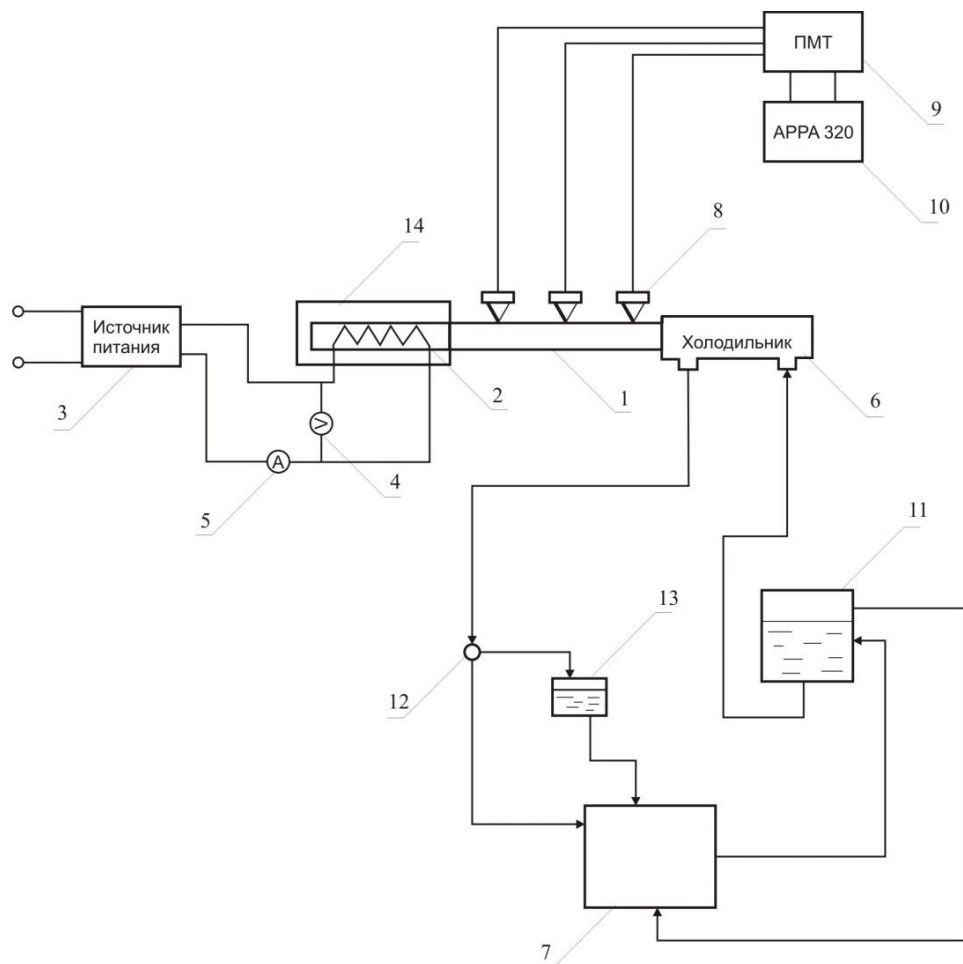


Рисунок 23 - Принципиальная схема установки для изучения свойств теплофизических свойств тепловой трубы

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

1 – тепловая трубка; 2 – нагреватель; 3 – лабораторный блок питания; 4 – вольтметр; 5 – амперметр; 6 – холодильник; 7 – термостат; 8 – термопара; 9 – переключатель термопар; 10 – мультиметр; 11 – бак постоянного уровня; 12 – трехходовой кран; 13 – мерный бачок; 14 – теплоизоляция.

Подаваемое на нагреватель электрическое напряжение и ток измеряются вольтметром 4 и амперметром 5. Верхний конец тепловой трубы находится в холодильнике 6 и охлаждается проточной водопроводной водой (для отвода тепла в зоне конденсации) из термостата 7. По длине тепловой трубки установлены три термопары 8. Термопары соединены с переключателем термопар 9, а показания снимаются мультиметром 10. Охлаждающая вода из термостата 7 поступает в бак постоянного уровня 11, а далее в холодильник 6. Для измерения расхода воды предусмотрен трехходовой кран 12 и мерный бачок 13.

3.3. ПРИНЦИП РАБОТЫ С УСТАНОВКОЙ

1. Включить термостат.
2. Включить лабораторный блок питания электрического нагревателя тепловой трубы и зафиксировать показания вольтметра и амперметра, определив мощность, данные занести в таблицу.
3. Включить мультиметр и поочередно опрашивая термопары через небольшой промежуток времени, до тех пор когда рост температуры в точках измерения не выйдет на стационарный режим.
4. Через каждую минуту до достижения тепловой трубы стационарного режима снимать показания с мультиметра и заносить их в таблицу.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		49

3.4. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Потребляемая нагревателем электрическая мощность превращается в тепловую и полностью передается через трубку, также считаем, что потери через теплоизоляцию отсутствуют.

Для каждого опыта с экспериментальной трубкой определили и занесли в таблицу следующие величины:

1. Тепловая мощность:

$$Q_{\text{тепл}} = I \cdot U, \quad (57)$$

где U - падение напряжения, V ; I - сила электрического тока, A .

2. Коэффициент теплопроводности:

$$\lambda = \frac{Q_{\text{тепл}}}{S \cdot \text{grad}T}. \quad (58)$$

3. Градиент температуры:

$$\text{grad}T = \frac{\Delta t}{l}, \quad (59)$$

где l - длина трубки, м.

4. Площадь поперечного сечения:

$$S = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (60)$$

где d - диаметр тепловой трубки, м.

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Сетевое планирование и управление – это комплекс графических и расчетных методов, организационных мероприятий, обеспечивающих моделирование, анализ и динамическую перестройку плана выполнения сложных проектов и разработок.

Метод сетевого планирования и управления предназначен для разработки исходного плана реализации комплекса работ и принятия эффективных решений в процессе выполнения плана. Применение сетевого планирования и управления позволяет повысить качество и эффективность управления сложными комплексами работ, сократить сроки их выполнения и требуемые ресурсы.

Сетевой график отражает состав, связи и последовательность выполнения комплекса работ и событий, направленных на достижение конечного результата.

Подготовка исходных данных для построения сетевого графика включает:

- определение начального и конечного событий;
- составление перечня всех событий, следующих за начальным и без которых не может произойти конечное событие;
- составление списка работ, соединяющих намеченные события;
- определение продолжительности выполнения каждой работы.

При построении сетевого графика должны учитываться следующие четыре правила:

- график должен иметь только одно начальное событие (исток) и только одно конечное событие (сток);
- ни одно событие не может произойти до тех пор, пока не будут закончены все входящие в него работы;

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		51

- ни одна работа, выходящая из какого-либо события, не может начаться до тех пор, пока не произойдет данное событие;

- график должен быть упорядоченным.

Для создание действующего стенда лабораторной установки необходимо выполнение следующих работ.

Таблица 8 – Список работ

Шифр работы	Наименование работы	Длительность работы t_{ij} , сут	Кол-во работников n_{ij} , чел
0-1	Формирование задачи	3	2
1-2	Подбор литературы	4	2
2-3	Изучение методов определения теплофизических свойств при фазовых превращениях	7	1
3-4	Аналитическое представление нахождения коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности	11	1
3-5	Изучение имеющихся установок	7	2
4-7	Моделирование эксперимента на компьютере	10	2
5-6	Разработка принципиальной схемы установки	5	1
6-7	Разработка чертежей	12	1
7-8	Приобретение необходимых комплектующих	15	1
8-9	Организация рабочего места. Подготовка необходимого места для лабораторной установке	7	3
9-10	Сбор камеры кипения	5	1
10-11	Монтаж камеры кипения	2	1
9-12	Монтаж установки с тепловой трубкой	8	2
12-13	Установка системы водного охлаждения	5	1
13-14	Установка системы воздушного охлаждения	2	1
12-15	Установка понижающего силового трансформатора	1	2
15-16	Установка регулятора	1	2
11-17	Подключение камеры к насосу	1	1

Продолжение таблицы 8

14-17	Организация водоснабжения стенда	4	1
16-17	Подвод вентиляции	5	1
17-18	Проверка лабораторного стенда на установленные требования электробезопасности	2	2
18-19	Проверка работы водного охлаждения	2	1
19-21	Проверка воздушного охлаждения	2	1
18-20	Проверка работы понижающего трансформатора	4	2
20-21	Проверка работы нагревателя	1	2
21-22	Устранение недочетов	7	3
22-23	Измерение плотности теплового потока	5	2
23-24	Измерение теплоотдачи и эффективной теплопроводности	5	2
24-25	Обработка и анализ полученных данных	5	1
25-26	Написание заключения о проделанной работе	10	1

Характеристики сетевого графика

Ранний срок свершения события t_j^p определяется величиной наиболее длительного отрезка пути от исходного до рассматриваемого события, причем $t^p(1) = 0$, а $t^p(N) = t_{kp}(L)$:

$$t_j^p = \max(t_i^p + t_{ij}), \quad (65)$$

где t_i^p - ранний срок наступления предшествующего i -ого события, t_{ij} - время выполнения работ, N - завершающее событие.

Поздний срок свершения события t_i^n характеризует самый поздний допустимый срок, к которому должно совершиться событие, не вызывая при этом срыва срока свершения конечного события:

$$t_i^n = \min(t_j^n - t_{ij}). \quad (66)$$

Этот показатель определяется «обратным ходом», начиная с завершающего события, с учетом соотношения $t^n(N) = t^p(N)$.

Резерв времени R_i i -ого события определяется как разность между поздним и ранним сроками его свершения:

$$R_i = t_i^n - t_i^p. \quad (67)$$

Резерв времени события показывает, на какой допустимый период времени можно задержать наступление этого события, не вызывая при этом увеличения срока выполнения комплекса работ.

Критические события резервов времени не имеют, так как любая задержка в свершении события, лежащего на критическом пути, вызовет такую же задержку в свершении завершающего события. Таким образом, определив ранний срок наступления завершающего события сети, мы тем самым определяем длину критического пути.

Раннее начало работы равняется раннему сроку наступления предшествующего события, т.е.

$$t_{ij}^{pn} = t_i^p. \quad (68)$$

Раннее окончание работы:

$$t_{ij}^{po} = t_{ij}^{pn} + t_{ij} = t_i^p + t_{ij}. \quad (69)$$

Позднее время окончания работы:

$$t_{ij}^{no} = t_j^n. \quad (70)$$

Позднее начало работы:

$$t_{ij}^{nn} = t_{ij}^{no} - t_{ij} = t_j^n - t_{ij}. \quad (71)$$

Полный резерв времени показывает, на сколько можно увеличить время выполнения конкретной работы при условии, что срок выполнения всего комплекса работ не изменится:

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		54

$$R_{i,j}^n = t_j^n - t_i^p - t_{ij}. \quad (72)$$

Частичный резерв первого рода – это часть полного резерва работы, позволяющая видеть, какая доля полного резерва может быть использована для увеличения продолжительности данной работы или последующих за ней работ, чтобы в результате указанного увеличения максимальные пути, проходящие через эти работы не превысили по продолжительности критического пути сетевой модели:

$$R_{i,j}^{nI} = t_j^n - t_i^n - t_{ij}. \quad (73)$$

Частичный резерв второго рода – это часть полного резерва работы, позволяющая видеть, какая доля полного резерва может быть использована для увеличения продолжительности данной работы или других, предыдущих ей работ, чтобы резервы времени последующих работ, лежащих на данном пути не изменились:

$$R_{i,j}^{nII} = t_j^p - t_i^p - t_{ij}. \quad (74)$$

Анализ сетевого графика

Критический путь: 0-1, 1-2, 2-3, 3-5, 5-6, 6-7, 7-8, 8-9, 9-12, 12-13, 13-14, 14-17, 17-18, 18-20, 20-21, 21-22, 23-24, 24-25, 25-26.

Продолжительность критического пути: 118 суток.

Сложность сетевого графика оценивается **коэффициентом сложности**, который определяется по формуле:

$$K_{cl} = \frac{n_{раб}}{n_{собр}}, \quad (75)$$

где $n_{раб}$ - количество работ; $n_{собр}$ - количество событий.

Сетевые графики, имеющие коэффициент сложности от 1,0 до 1,5, являются простыми, от 1,51 до 2,0 – средней сложности, более 2,1 – сложными.

Согласно формуле (75) получаем:

$$K_{cl} = \frac{30}{26} = 1,15. \quad (76)$$

					ФЮРА.XXXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		55

Поскольку $K_{cl} < 1,5$, то сетевой график является простым.

Таблица 9 – Параметры работ сетевого графика

Работа (i,j)	Ранние сроки		Поздние сроки		Резерв времени		
	начало	окончание	начало	окончание	полный	резерв I-го рода	резерв II-го рода
0-1	0	3	0	3	0	0	0
1-2	3	7	3	7	0	0	0
2-3	7	14	7	14	0	0	0
3-4	14	25	14	28	3	3	0
3-5	14	21	14	21	0	0	0
4-7	25	38	28	38	3	0	3
5-6	21	26	21	26	0	0	0
6-7	26	38	26	38	0	0	0
7-8	38	53	38	53	0	0	0
8-9	53	60	53	60	0	0	0
9-10	60	65	60	76	11	11	0
10-11	65	67	76	78	11	0	0
9-12	60	68	60	68	0	0	0
12-13	68	73	68	73	0	0	0
13-14	73	75	73	75	0	0	0
12-15	68	69	68	73	4	4	0
15-16	69	70	73	74	4	0	0
11-17	67	79	78	79	11	0	11
14-17	75	79	75	79	0	0	0
16-17	70	79	74	79	4	0	4
17-18	79	81	79	81	0	0	0
18-19	81	83	81	84	1	1	0
19-21	83	86	84	86	1	0	1
18-20	81	85	81	85	0	0	0
20-21	85	86	85	86	0	0	0
21-22	86	93	86	93	0	0	0
22-23	93	98	93	98	0	0	0
23-24	98	103	98	103	0	0	0
24-25	103	108	103	108	0	0	0
25-26	108	118	108	118	0	0	0

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ

Лист

56

Составление сметы расходов на выполнение договора

В осуществлении работ по данному договору было задействовано 3 человека: руководитель проекта - доцент кафедры АТЭС и 2 исполнителя - ассистенты данной кафедры.

Оклад доцента составляет 27 500 рублей в месяц, а оклад ассистента - 17 500 рублей в месяц. Все работы согласно договору были выполнены в течение 118 рабочих дней или 4 месяцев и 27 дней с учетом 6 дневной рабочей недели и праздников.

Исходя из этого заработная плата каждого работника:

$$ЗП_{доц} = 27500 \cdot 4 + \frac{27500 \cdot 16}{25} = 127600 \text{ руб.}, \quad (77)$$

$$ЗП_{ас} = 17500 \cdot 4 + \frac{17500 \cdot 16}{25} = 81200 \text{ руб.} \quad (78)$$

В итоге фонд заработной платы составил:

$$ЗП = ЗП_{доц} + 2 \cdot ЗП_{ас} = 127600 + 2 \cdot 81200 = 290000 \text{ руб.} \quad (79)$$

Начисления на выплаты по оплате труда равны:

$$ВнФ = (ФСС + ПФР + ФФОМС) \cdot ЗП = 0,3 \cdot 290000 = 87000 \text{ руб.}, \quad (80)$$

где $ФСС = 2,9\%$ - выплаты в фонд социального страхования; $ПФР = 22\%$ - выплаты в фонд пенсионного страхования; $ФФОМС = 5,1\%$ - выплаты в фонд обязательного медицинского страхования.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		57

Таблица 10 – Расходные материалы и их стоимость

Наименование	Ко л-во, шт	Цена, руб/шт	Стоим ость, руб
Понижающий силовой трансформатор	1	28000	28000
Компрессор	1	6855	6855
Термопары хромель-копелевые	2	334	668
Гофрированная труба ПВХ 32 мм	10 м	5,81 руб/м	58
Шланг ½ 10 м	1	403	403
Фланцы	4	1473	5892
Труба из нержавеющей стали	1	326	326
Термостат	1	7300	7300
Хомуты для шлангов 15-24/12	20	38,94	779
Прочее	-	-	10 000
Итого			60281

Накладные расходы примем в размере 10% от основных средств. Работы по наладке оборудования будут производиться сторонними организациями, оплата которых так же будет учтена в смете. На услуги связи выделим 300 рублей в месяц на 1 человека или 4500 руб.

Таблица 11 – Смета на выполнения работ

Наименование статей расходов	Всего, руб
Оплата труда	290000
Начисления на выплаты по оплате труда	87000
Оплата услуг связи	4500
Увеличение стоимости основных средств	10 000
Увеличение стоимости материальных запасов	60281
Прочие услуги:	
- сварочные работы	10000
- сверлильные работы	5000
- токарные работы	20000
Арендная плата за пользование имуществом	0
Итого прямые расходы	481781
Накладные расходы	53531
Итого без НДС	535312
НДС	96356

5. РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕРМОСТАТЕ

Описание объекта регулирования

Термостат — это устройство, позволяющее поддерживать постоянную температуру в замкнутом пространстве. Применяется в бактериологических и вирусологических лабораториях для культивирования микроорганизмов при определенной температуре, а также в клинических лабораториях для проведения различных химических анализов.

В данной работе термостат используется для проведения лабораторной работы “Определение коэффициента теплопроводности тепловой трубы”. Термостат ТС-16 показан на рисунке 25.

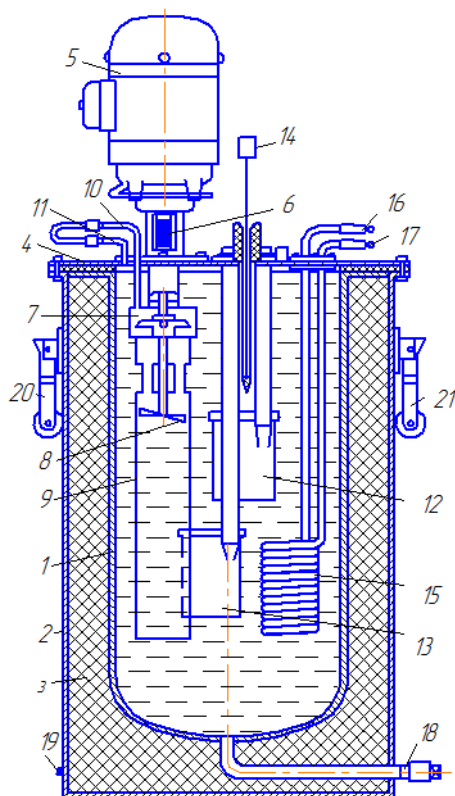


Рисунок 25 - Термостат типа ТС-16

Латунный цилиндрический сосуд *1* вместимостью 24 л помещен в металлический кожух *2*, покрытый изнутри теплоизоляцией *3*. Сосуд накрыт крышкой *4*, на которой установлен электродвигатель *5*, соединенный

Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата

ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ

Лист

59

муфтой **6** с осью, приводящей в движение насос **7** и мешалку **8**. Последняя расположена в патрубке **9**, имеющем вверху окна для прохода жидкости. Насос термостата используется лишь в случае, когда требуется поддерживать постоянной температуру в каком-либо внешнем аппарате. Тогда жидкость из термостата подается в аппарат через штуцер **10** и возвращается через штуцер **11**. При отсутствии аппарата штуцера закорачиваются трубкой.

Нагрев жидкости в термостате производится электронагревателями **12** и **13** мощностью соответственно 700 и 1300 Вт. Нагреватели помещены в защитные чехлы, закрепленные на крышке **4**. По достижении заданной температуры нагреватель **12** переключают на второй предел мощности, равный 175 Вт, предназначенный для автоматического поддержания в термостате постоянной температуры посредством терморелы ХК - **14**, подключенной к прибору 2ТРМ1. После этого с помощью регулируемого автотрансформатора изменяют мощность нагревателя **13** так, чтобы температура в термостате не превышала заданной.

Сосуд термостата заполняется жидкостью так, чтобы ее уровень находился на минимальном расстоянии от крышки. Для опорожнения сосуда служит трубка **18** с пробкой. Кожух термостата заземляют при помощи зажима **19**. Для переноски термостат снабжен ручками **20** и **21**.

Термостат питается от сети переменного тока напряжением 220 В. При заполнении сосуда водой поддержание заданной температуры производится в пределах 30 - 99 °С, а при заполнении маслом - в пределах 100 - 200 °С. Точность поддержания температуры $\pm 0,05$ °С. Время разогрева термостата до максимальной температуры при заполнении водой 90, маслом - 120 мин. Габариты устройства 440·410·870 мм.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		60

Выбор принципиальной схемы контроля и автоматического регулирования температуры в термостате

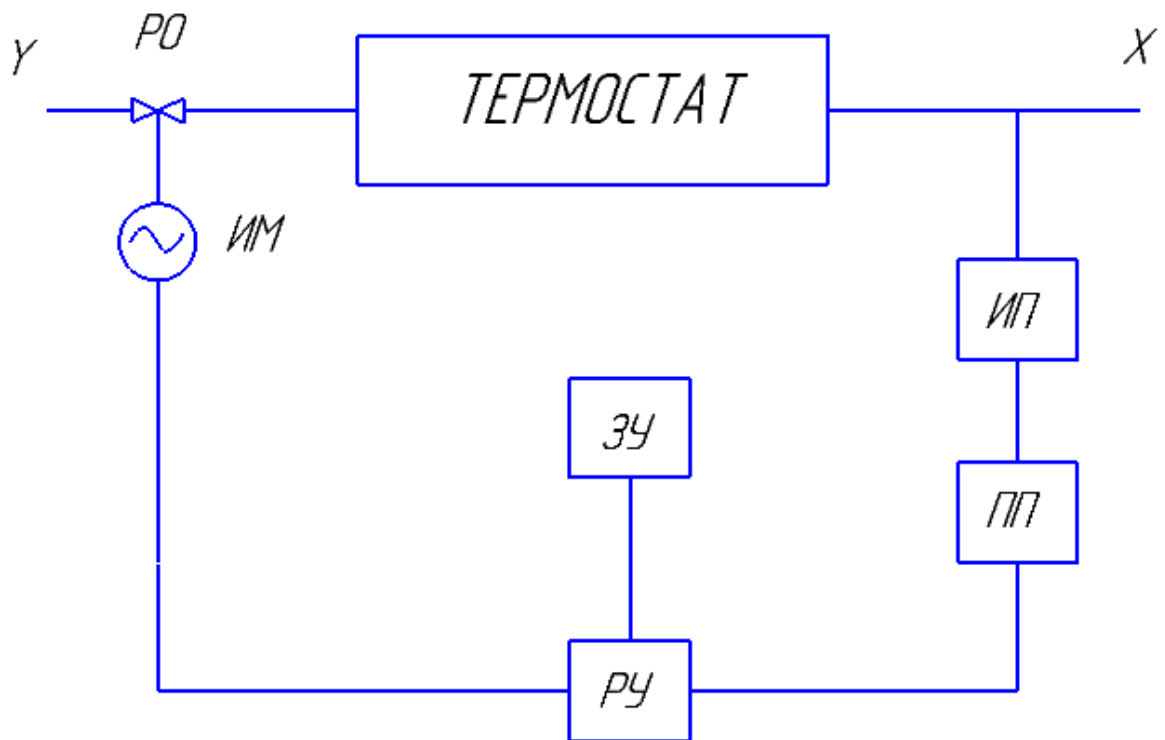


Рисунок 26 - Структурная схема АСР

ИП – измерительный преобразователь; ПП - промежуточный преобразователь; РУ - регулирующее устройство; ЗУ - задающее устройство; ИМ - исполнительный механизм; РО - регулирующий орган.

Цель автоматического регулирования состоит в поддержании постоянной температуры

Температура в термостате задается задающим устройством (ЗУ) и поддерживается с помощью регулятора температуры (РУ), который управляет работой исполнительного механизма (ИМ) которым является автотрансформатор с помощью которого производится изменение индуктивности дросселей (РО). Сигнал для управления работой регулятора снимается с термопары (ИП).

Разработка функциональной схемы АСР термостата

Функциональная схема является основным техническим документом, определяющим функционально-блочную структуру отдельных узлов автоматического контроля, управления и регулирования технологического процесса и оснащение объекта управления приборами и средствами автоматизации.

Проектируемая в дипломном проекте система автоматического регулирования предназначена для стабилизации температуры в термостате.

При разработке функциональной схемы АСР термостата решены следующие задачи:

- на технологической схеме объекта автоматизации определено местоположение точек отбора измерительной информации и точек воздействия на регулируемые параметры;
- определены предельные рабочие значения контролируемых параметров;
- выбрана структура измерительных каналов и каналов передачи управляющих воздействий;
- выбраны методы и технические средства получения, преобразования, передачи и представления измерительной информации, а также технические средства выработки управляющих воздействий;
- решены вопросы размещения технических средств автоматизации (ТСА) на технологическом оборудовании и на щитах;
- согласованы параметры измерительных каналов.

Функциональная схема АСР термостата представлена на листе ФЮРА.421000.006 С2.

Выбор технических средств АСР

Измеритель-регулятор микропроцессорный 2ТРМ1 совместно с первичными преобразователями (датчиками) предназначен для измерения и регулирования температуры и других физических параметров, значение

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		62

которых внешним датчиком может быть преобразовано в сигналы постоянного тока или напряжения.

Прибор может быть использован для измерения и регулирования технологических процессов в различных отраслях промышленности, коммунального и сельского хозяйства.

Прибор позволяет осуществлять следующие функции:

- измерение температуры и/или других физических величин (давления, влажности, расхода, уровня и т.п.) в двух различных точках с помощью стандартных датчиков, подключаемых к универсальным входам прибора;
- скоростные измерения (0,1 с) с использованием унифицированных датчиков тока или напряжения;
- компенсация температуры ХС термопар с использованием выносного датчика, подключаемого к одному из входов;
- независимое регулирование двух измеряемых величин по двухпозиционному (релейному) закону;
- регулирование одной измеряемой величины по трехпозиционному закону;
- вычисление и регулирование разности двух измеряемых величин;
- вычисление квадратного корня из значений унифицированных входных сигналов;
- отображение выбранного текущего измерения на встроенном светодиодном цифровом индикаторе;
- формирование выходного тока 4...20 мА или напряжения 0...10 В для регистрации или управления исполнительными механизмами по П-закону.

Термопара (термоэлектрический преобразователь) типа ТХА, ТХК, ТПП состоит из двух спаянных на одном из концов проводников, изготовленных из металлов, обладающих разными термоэлектрическими свойствами. Спаянный конец, называемый «рабочим спаем», погружается в измеряемую среду, а

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		63

свободные концы («холодный спай») термопары подключаются ко входу измерителей регуляторов. Если температуры «рабочего» и «холодного спаев» различны, то термопара вырабатывает термоЭДС, которая и подается на прибор. Поскольку термоЭДС зависит от разности температур двух спаев термопары, то для получения корректных показаний необходимо знать температуру «холодного спаия», чтобы скомпенсировать эту разницу в дальнейших вычислениях. В модификациях входов, предназначенных для работы с термопарами, предусмотрена схема автоматической компенсации температуры свободных концов термопары. Датчиком температуры «холодного спаия» служит полупроводниковый диод, установленный рядом с присоединительным клеммником. Подключение термопар к прибору должно производиться с помощью специальных компенсационных проводов, изготовленных из тех же материалов, что и термопара. Допускается использовать провода из металлов с термоэлектрическими характеристиками, аналогичными характеристикам материалов электродов термопары в диапазоне температур 0...100 °С. При соединении компенсационных проводов с термопарой и прибором необходимо соблюдать полярность. Во избежание влияния помех на измерительную часть прибора линию связи прибора с датчиком рекомендуется экранировать. В качестве экрана может быть использована заземленная стальная труба. При нарушении указанных условий могут иметь место значительные погрешности при измерении. Термопреобразователь обладает высокой термоэлектрической стабильностью при нагревах до 600 °С, обусловленной тем, что изменение термоЭДС хромелевого и копелевого термоэлектродов направлены в одну и ту же сторону и компенсируют друг друга. Технический ресурс термопар может составлять несколько десятков тысяч часов. К недостаткам ТХК можно отнести относительно высокую чувствительность к деформации. Для термометров с термоэлектродами диаметром менее 1 мм верхний предел длительного применения менее 600 °С и составляет, например, для термоэлектродов

					ФЮРА.XXXXXX.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		64

диаметром 0,2,0,3 мм только 400 °С. Верхний предел применения определяется стабильностью характеристик копелевого термоэлектрода.

Таким образом, была выбрана термопара ХК, обладающая следующими свойствами: высокая точность измерения температур, большой температурный диапазон измерения, простота, дешевизна, надежность.

					ФЮРА.ХХХХХХ.001 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ документа	Подпись	Дата		65