

На правах рукописи

НЕДАЙВОЗОВ АЛЕКСЕЙ ВИКТОРОВИЧ

**ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» («МГТУ им Н.Э. Баумана»).

Научный руководитель: **Афанасьев Валерий Никанорович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Теплофизика» ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

Официальные оппоненты: **Кузма-Кичта Юрий Альфредович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Инженерной теплофизики ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Кузнецов Владимир Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией теплофизики многофазных систем ФГБУН Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе СО РАН.

Ведущая организация: **ГНЦ ФГУП «Центр Келдыша».**

Защита состоится «23» октября 2019 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.08 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, Лефортовская наб., д. 1, ф-т «Энергомашиностроение», ауд. 202э.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте <http://www.bmstu.ru> и в библиотеке МГТУ им Н.Э. Бауман.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба присылать по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, д. 5 стр. 1, МГТУ им. Н. Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.08.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.08,
кандидат технических наук, доцент

 Егоров К. С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное состояние и тенденции развития различных областей техники требуют разработки новых технологий и образцов технологического и энергоиспользующего оборудования с интенсивным протеканием производственных процессов. Успешное решение этих задач во многих случаях определяется решением проблемы тепловой защиты теплонапряженного оборудования, возможностью обеспечения необходимого температурного уровня работы машин, приборов и устройств, применением эффективных способов передачи и трансформации тепловой энергии. Указанные проблемы решаются или могут быть решены применением теплопередающих устройств, работающих по замкнутому испарительно-конденсационному циклу и получивших название контурные тепловые трубы (КТТ).

Контурные тепловые трубы успешно используются в различных системах охлаждения и терморегулирования, расширяя с каждым годом их возможности и сложность решаемых задач. Использование КТТ в энергомашиностроении, металлургии, химической технологии, в радиоэлектронике, авиационной и, особенно, в ракетно-космической, а в последнее десятилетие в электронной и компьютерной технике обусловлено их основными свойствами: способностью передавать теплоту при произвольной ориентации в поле действия массовых сил; существенное уменьшение массы и габаритов теплопередающих систем; удобство и простота монтажа и обслуживания; не требуют затрат энергии на перемещение теплоносителя и отсутствие подвижных деталей; возможность изготовления теплоотводов различной геометрической формы; бесшумность; долговечность и надежность работы.

Однако, на пути внедрения КТТ в системы охлаждения компактных электронных устройств имеется ряд препятствий, таких как миниатюризация их корпусов, существенная толщина испарителя, совершенствование технологии их производства, обеспечение надежной стабильной работы, а также улучшение тепловых характеристик.

Характеристики контурных тепловых труб зависят от конструкции как испарителя и компенсационной полости КТТ, так и от геометрических параметров паропровода, типа конденсатора, его положения в пространстве и др. Однако, существенное влияние конструктивных особенностей КТТ, особенно диаметра паропровода и положение конденсатора в пространстве, проявляется при невысоких тепловых потоках, когда давление насыщенных паров в зоне испарения невелико. Так, в определенном диапазоне тепловых мощностей наблюдается неустойчивая работа КТТ, сопровождающаяся пульсациями рабочих температур КТТ, амплитуда которых может достигать нескольких десятков градусов. Такой режим работы КТТ в большинстве случаев недопустим и требует подробного экспериментального исследования.

Наряду с экспериментальным исследованием контурных тепловых труб были предприняты попытки аналитического описания работы устройства. Применение численного трехмерного моделирования позволит не только

получить тепловое состояние рассматриваемого узла КТТ, но и оптимизировать конструкцию, улучшить понимание процессов, протекающих в испарителе и компенсационной полости контурной тепловой трубы.

Цель работы. Установление механизмов и физических закономерностей появления колебательных режимов работы КТТ при низких тепловых нагрузках и способов их устранения. Разработка и создание методики расчета основных конструктивных элементов КТТ (испарителя и компенсационной полости) и численное моделирование их теплового состояния.

Объектом исследований являются фазовые переходы, гидродинамические и тепломассопереносные процессы в КТТ.

Предметом исследований являются теплогидравлические характеристики и режимы работы КТТ, параметры состояния теплоносителя и коэффициент теплоотдачи при кипении.

Задачи работы.

1. Разработка и создание методологии и программного обеспечения, необходимых для диагностики и расчета основных конструктивных элементов и характеристик КТТ.

2. Разработка и создание экспериментальной установки для комплексного исследования теплофизических и конструкционных проблем в плоской контурной тепловой трубе.

3. Экспериментальные исследования влияния типов конденсатора и режимов внешнего охлаждения конденсатора на процессы запуска и работы КТТ.

4. Экспериментальные исследования влияния геометрических параметров паропровода на процессы запуска и работы КТТ.

5. Экспериментальные исследования причин возникновения колебательного режима работы КТТ при низких тепловых нагрузках.

6. Разработка и верификация методики трехмерного теплового расчета испарителя и компенсационной полости.

7. Проведение численных исследований влияния поля массовых сил и способа подвода тепловой мощности на результат теплового расчета испарителя и компенсационной полости.

Научная новизна работы.

1. Проведены систематические исследования теплофизических и конструкционных проблем создания контурных тепловых труб.

2. Создана новая конструкция КТТ с центральным вертикальным паропроводом, проходящим через компенсационную полость. Данная конструкция обеспечивает равномерный подвод теплоносителя, тепловой нагрузки и пароотвод от поверхности нагрева. Важной особенностью данной конструкции является обеспечение стабильной стационарной работы устройства в режиме термосифона при низких тепловых нагрузках.

3. Экспериментально установлено парожидкостное течение теплоносителя в паропроводе, режим которого зависит от подводимой тепловой мощности, конструктивных особенностей паропровода и расположения конденсатора в

пространстве.

4. Экспериментально установлено, что режим работы КТТ при низких тепловых мощностях зависит от режима течения теплоносителя в паропроводе (снарядный и кольцевой режимы). Впервые показано, что при низких тепловых мощностях колебательный режим работы КТТ наблюдается только при снарядном режиме течения теплоносителя в паропроводе.

5. Экспериментально установлена пороговая величина подводимой тепловой мощности, ниже которой КТТ работает в режиме термосифона.

6. Предложена методика трехмерного теплового расчета испарителя и КП плоской контурной тепловой трубы. Данная методика позволила рассчитать тепловое состояние испарителя и КП, хорошо согласующееся с экспериментально полученными данными.

7. Численными методами исследования установлено, что при исследованных тепловых мощностях кипение теплоносителя наблюдается как на ребрах и верхней поверхности пластины нагрева, так и частично на поверхности пористого элемента в местах контакта с ребрами.

8. Численными методами установлено, что область подвода тепловой нагрузки, обеспечивающая минимальную и равномерную температуру поверхности нагрева и равномерное испарение теплоносителя в испарителе, соответствует размерам зоны испарения.

Практическая значимость работы.

Научная ценность. Исследование существующего представления о закономерностях протекания физических процессов в КТТ показывает, что пока не существует единого подхода в его понимании. В силу этого, научная ценность работы заключается в полученных в ходе выполнения диссертации экспериментальных результатах, которые дадут возможность развивать существующие и предложить новые теоретические подходы. Кроме того, использование разработанных оригинальных методик в дальнейших исследованиях КТТ позволит повысить точность и надёжность получаемых результатов.

Практическая ценность. Полученные экспериментальные результаты, разработанная расчётная методика, а также полученные в результате обработки экспериментальных данных эмпирические формулы позволяют обоснованно выбирать для создаваемых и разрабатываемых КТТ оптимальные теплофизические параметры.

Достоверность результатов подтверждена:

- использованием современных аттестованных средств измерения и апробированных методов определения параметров;
- оценкой неопределенности измерений;
- согласование полученных экспериментальных и расчетных данных с общеизвестными (как теоретическими, так и экспериментальными) данными других авторов.

Основные положения, выносимые на защиту диссертационной работы.

- Результаты экспериментального исследования влияния геометрических параметров элементов конструкции контурной тепловой трубы на процесс запуска и режим работы установки.
- Экспериментальные данные по режимам течения теплоносителя в паропроводе в зависимости от подводимой тепловой мощности, диаметра паропровода, положения конденсатора в пространстве.
- Методика теплового расчета испарителя и компенсационной полости контурной тепловой трубы.
- Результаты численного исследования влияния поля массовых сил и способа подвода тепловой мощности на тепловое состояние испарителя и КП.

Апробация работы. Результаты исследований докладывались и обсуждались на: Общеуниверситетской научно-технической конференции «Студенческая научная весна - 2013» (Москва, 2013); Российской Национальной Конференции по Теплообмену РНКТ-6 (Москва, 2014); XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (г. Звенигород, Московская обл., Россия, 2015).

Публикации. Основные результаты и положения диссертационной работы изложены в 8 публикациях. Три статьи [1-3] опубликованы в журналах, входящих в перечень рецензируемых журналов ВАК Минобрнауки России.

Личный вклад автора. Постановка цели и задач исследования осуществлена совместно с научным руководителем доктором технических наук, профессором Афанасьевым В.Н. Экспериментальные результаты по исследованию теплофизических и конструкционных проблем КТТ получены лично автором на экспериментальных стендах кафедры. Кроме того, личный вклад автора состоял: в разработке общей концепции и методики проведения экспериментов; в создании стенда и их отдельных подсистем; в разработке программного обеспечения, необходимого для работы стенда и обработки полученных результатов. Автором лично разработана и предложена методика теплового расчета испарителя и компенсационной полости КТТ, создана расчетная модель, методами CFD (Computational Fluid Dynamics) проведены тепловые расчеты и обработаны результаты. Автором в ходе трехмерного теплового расчета были написаны вспомогательные программы замыкающих зависимостей (коэффициенты теплоотдачи при кипении).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, содержащего основные выводы по работе, списка используемых источников. Общий объем диссертации составляет 157 страниц машинного текста и включает 97 рисунков, 9 таблиц и 107 наименований источников литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы; сформулированы цели и задачи; определена научная новизна и практическая ценность; представлено краткое содержание работы; описаны методы исследования и результаты апробации работы.

В первой главе представлен обзор литературы по конструктивным особенностям контурной тепловой трубы, принципам и режимам ее работы, методам моделирования стационарного теплового состояния как отдельных ее узлов, так и контура КТТ в целом.

Проведен обзор современного состояния проблем разработки, создания и работоспособности контурных тепловых труб. Показано существование различных режимов работы КТТ: стационарный, колебательный и режимы нарушения работоспособности КТТ. Отмечено существенное влияние конструктивных особенностей КТТ, таких как конструкция конденсатора, его положение в пространстве и др., а также влияние подводимой тепловой мощности и уровня заправки теплоносителя на режим работы устройства. Несмотря на большое количество, в первую очередь, экспериментальных работ, причины возникновения неустойчивых колебательных режимов работы КТТ полностью не изучены и требуют подробного экспериментального исследования.

Отмечена важность экспериментального исследования влияния геометрических параметров паропровода на процесс запуска и работу КТТ. Большинство авторов экспериментальных работ утверждают, что в паропроводе теплоноситель – перегретый пар. Однако, в некоторых работах показана возможность существования жидкой фазы в паропроводе на стационарных режимах работы КТТ. Для подтверждения данного результата возникает необходимость подробного экспериментального исследования параметров состояния теплоносителя и режимов его течения в паропроводе. Кроме того, при анализе литературы не обнаружено экспериментальных работ по исследованию влияния геометрических особенностей паропровода на режим течения теплоносителя в нем и на режим работы устройства в целом.

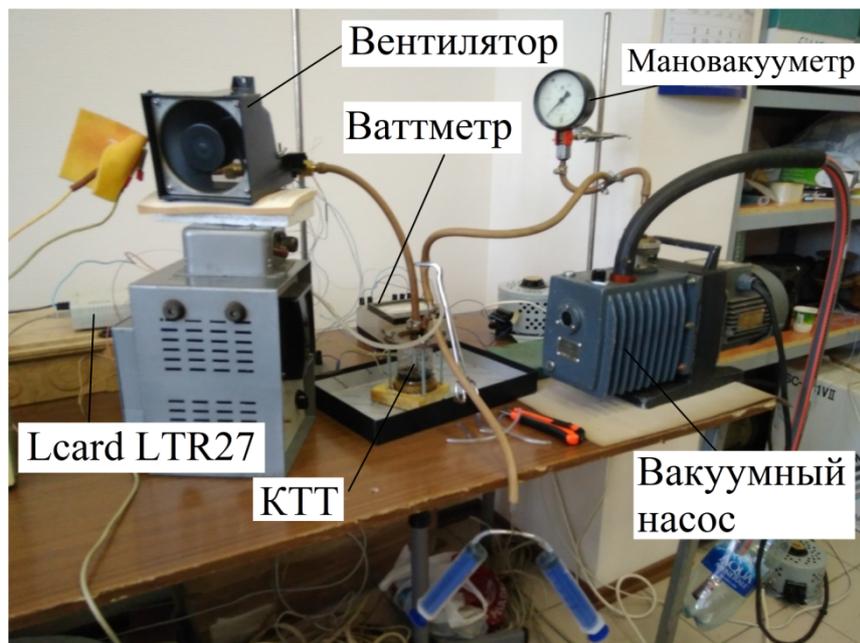
На основании анализа литературы сформулирована цель диссертационной работы и основные задачи для её достижения.

Во второй главе представлены описание экспериментального стенда, результаты тестирования программного обеспечения и методологии определения характеристик КТТ. С помощью специально поставленных экспериментов подтверждена работоспособность и эффективность методологии и определена её неопределенность измерения. В работе был создан стенд (Рисунок 1, а) с измерительным оборудованием, способным отслеживать поле температур КТТ в режиме реального времени. С этой целью использовалась измерительно-информационная система, основанная на встраиваемой многофункциональной многоканальной плате сбора данных Lcard LTR27. Измерение температур проводилось с помощью термопар К-типа.

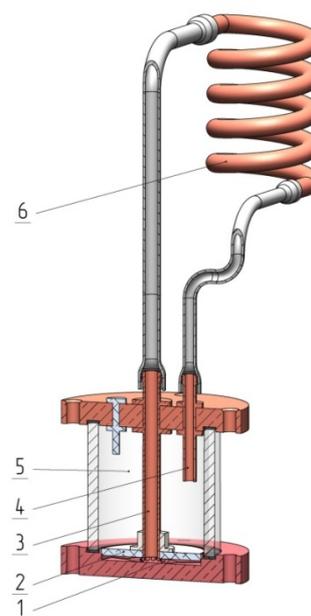
Экспериментальный стенд (Рисунок 1, а) состоит из рабочего участка (КТТ), вакуумного насоса, плоского керамического нагревателя WATLOW, ваттметра, лабораторного трансформатора, мановакуумметра, вентилятора, выпрямителя ВС-24м, встраиваемой многофункциональной многоканальной платы сбора данных Lcard LTR27.

Рабочий участок представляет собой плоскую контурную тепловую трубу (Рисунок 1, б), которая состоит из испарителя 1 и конденсатора 6, соединенные между собой трубопроводами: паропроводом 3 и конденсатопроводом 4, что является одним из важнейших отличий традиционной тепловой трубы от КТТ, т.е в КТТ пар и конденсат не контактируют между собой.

Испаритель (область между нижней поверхностью фитиля и верхней поверхностью пластины нагрева) включает в себя латунную пластину нагрева диаметром $d=75$ мм и толщиной $h=7,5$ мм с припаянными к ней ребрами диаметром 1,9 мм, пространство между которыми служит пароотводными каналами. На испаритель устанавливается металлический фитиль 2 (спеченный порошок марки ПНС 10). К испарителю примыкает компенсационная полость 5, стенки которой выполнены из оптического стекла, что позволяет визуализировать процессы, протекающие в испарителе, фитиле и в компенсационной полости.



а



б

Рисунок 1. Экспериментальный стенд с плоской контурной тепловой трубой: а – экспериментальный стенд; б – плоская контурная тепловая труба.

В ходе экспериментальных исследований использовались следующие типы конденсаторов: медный конденсатор типа «змеевик» (Рисунок 1, б); медный цилиндрический конденсатор длиной 100 мм (Рисунок 2, а); прозрачный полипропиленовый цилиндрический конденсатор с дросселем на входе (Рисунок 2, б).

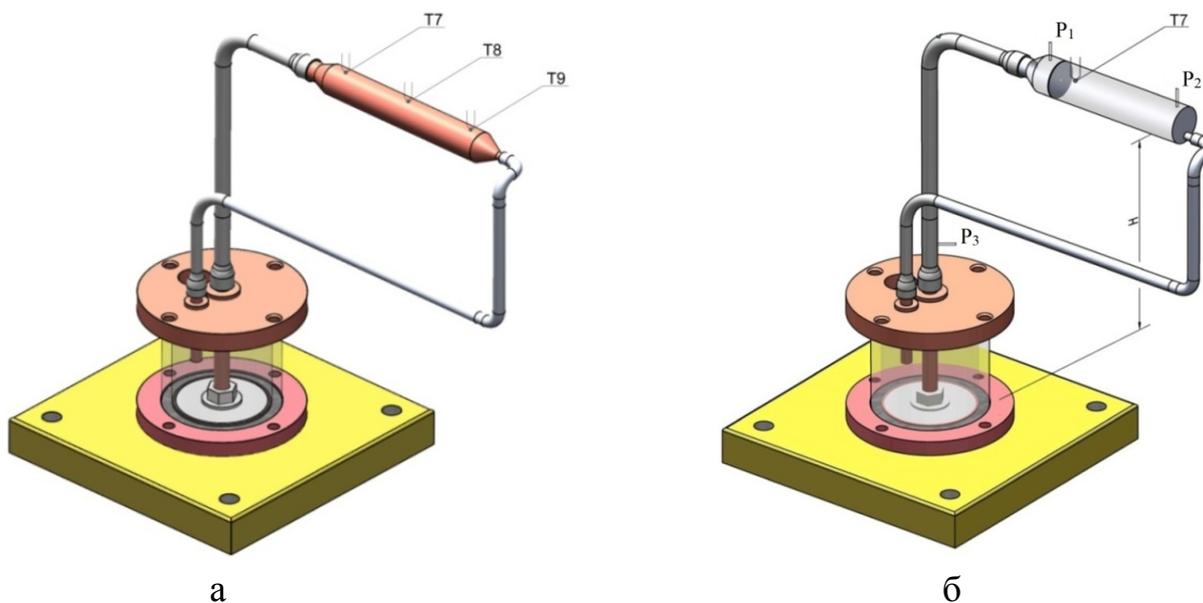


Рисунок 2. КТТ с медным (а) и полипропиленовым (б) цилиндрическим конденсатором.

В эксперименте проводились измерения температур в следующих точках КТТ: T_1 и T_2 – температуры на внешней и внутренних поверхностях латунной пластины нагрева; T_3 , T_4 – температуры на нижней и верхней поверхностях фитиля; T_5 – в компенсационной полости; T_6 – температура пара на выходе из испарителя; T_7 – T_9 , T_{12} – температуры наружной поверхности конденсатора (для конденсатора с дросселем T_7 – внутри); T_{10} – температура на внешней поверхности латунной крышки; T_{11} – температура теплоносителя на входе в КП. Максимальная абсолютная неопределенность измерения температуры равна $\pm 1,2$ °С.

В экспериментальном исследовании работоспособности КТТ с открытой компенсационной полостью измерялись следующие перепады (Рисунок 2, б): в точке P_1 измерялось манометрическое давление в начале конденсатора $\Delta P_1 = P_1 - P_{\text{атм}}$; перепад давления между точками P_1 и P_2 $\Delta P_2 = P_1 - P_2$ – перепад давления между входом и выходом конденсатора; перепад давления между точками P_3 и P_1 $\Delta P_3 = P_3 - P_1$ – перепад давления между выходом из испарителя и входом в конденсатор. Абсолютная неопределенность измерения перепада давления составляет ± 10 Па.

Для выполнения целей и задач, поставленных в работе, экспериментальное исследование режимов работы КТТ разбивалось на два этапа.

На первом этапе, для отработки методики измерения, проводились экспериментальные исследования процесса запуска и работы контурной тепловой трубы с открытой компенсационной полостью.

На втором этапе проводились экспериментальные исследования режимов работы КТТ с вакуумизацией контура, т.е. исследование работы традиционной контурной тепловой трубы.

В качестве теплоносителя во всех экспериментальных исследованиях использовалась деионизированная дистиллированная вода.

В третьей главе приводятся результаты экспериментального исследования КТТ с открытой компенсационной полостью и традиционной КТТ. Показано влияние типа конденсатора, взаимного расположения испарителя и конденсатора, а так же диаметра паропровода на запуск и режим работы устройства. Обнаружено и продемонстрировано двухфазное течение теплоносителя в паропроводе.

Первый этап. КТТ с открытой компенсационной полостью.

Результаты экспериментального исследования:

1. Наблюдается стационарный режим работы КТТ с каждым типом конденсатора при расположении конденсатора выше зоны испарения на 400 мм и 200 мм. При расположении конденсатора ниже зоны испарения запуск КТТ не наблюдался.

2. Обнаружено, что при запуске и при значительном изменении мощности конденсатора наблюдается переходной режим работы КТТ (регион 1 Рисунок 3), для которого характерно пульсационное изменение температур. Причиной появления пульсаций температур является периодически повторяющиеся перемещения конденсата на участке конденсатор–КП, как следствие, попадание жидкого теплоносителя в паропровод и в испаритель. Для предотвращения неустойчивых переходных режимов работы КТТ была создана и исследована конструкция прозрачного цилиндрического конденсатора с установленным на входе дросселем. Установка дросселя обеспечивает низкую амплитуду колебаний температуры поверхности нагрева, но приводит к появлению ограничения по пусковой мощности.

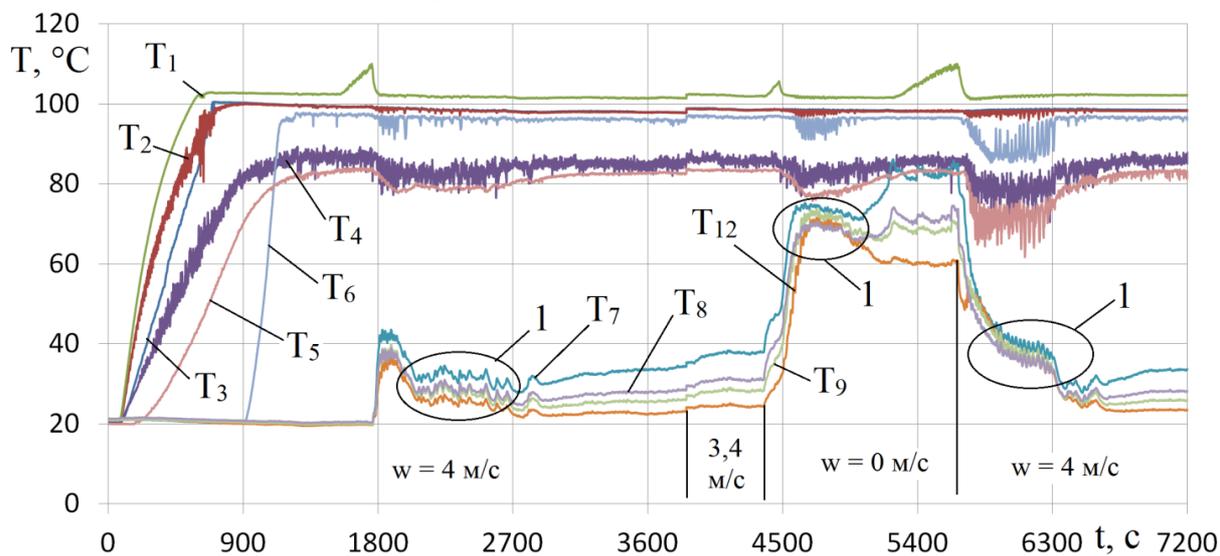


Рисунок 3. Изменения температуры в КТТ с медным цилиндрическим конденсатором от времени в зависимости от режима внешнего охлаждения конденсатора при тепловой мощности 80 Вт ($H=400$ мм; $T_{\text{окр}}=24$ °C).

3. Запуск конденсатора приводит к возникновению разрежения в испарителе и конденсаторе, величина которого зависит от мощности конденсатора и температуры окружающей среды (Рисунки 4, 5). Максимальное разрежение создавалось медным цилиндрическим конденсатором и составляло 2500 Па.

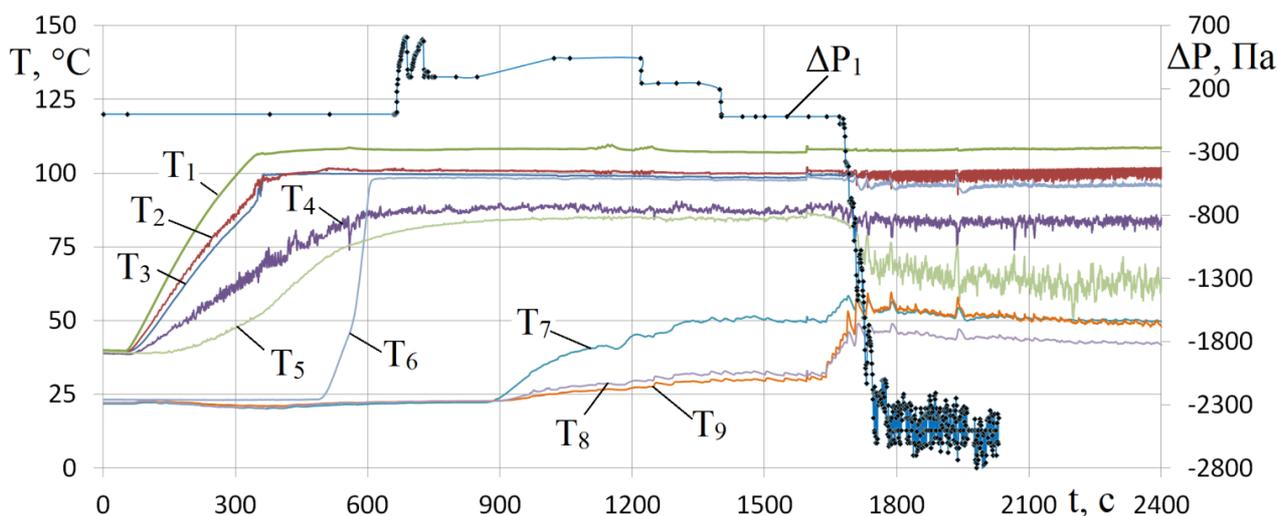


Рисунок 4. Изменения температуры и перепада давления ΔP_1 в КТТ с медным цилиндрическим конденсатором от времени при скорости потока $w = 3,4$ м/с и тепловой мощности 100 Вт ($H=400$ мм, $T_{\text{окр}}=22$ °С).

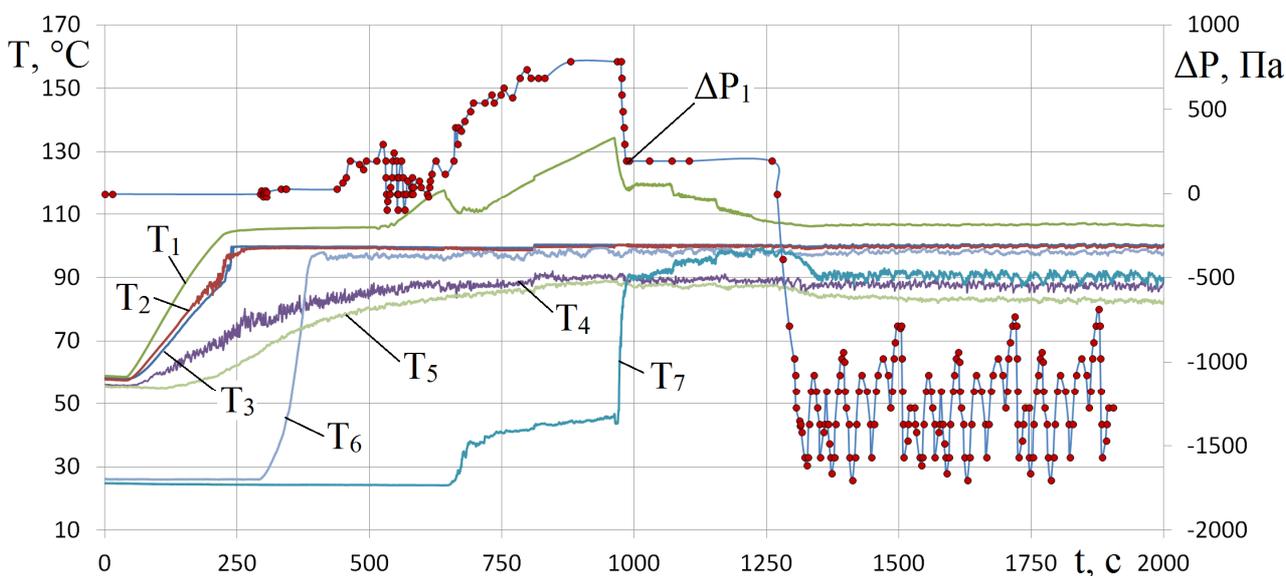
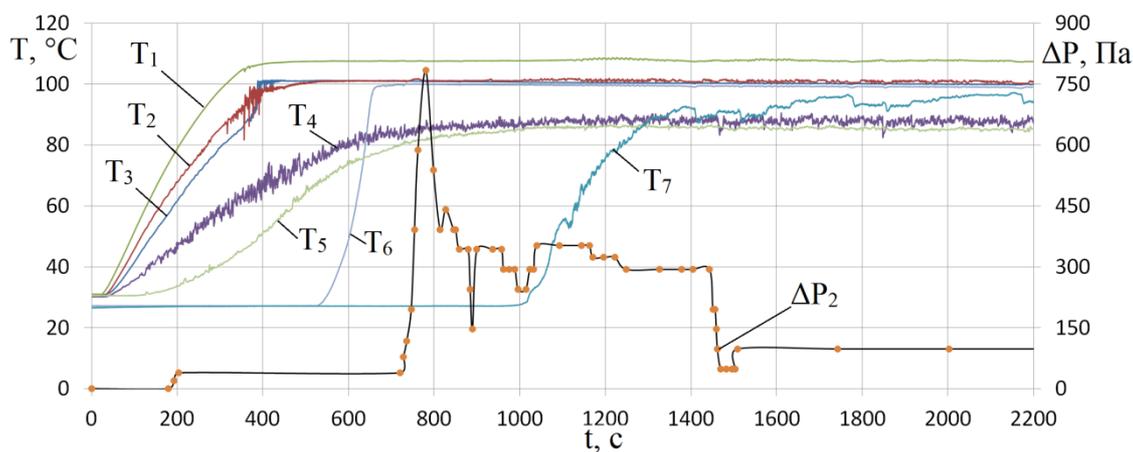
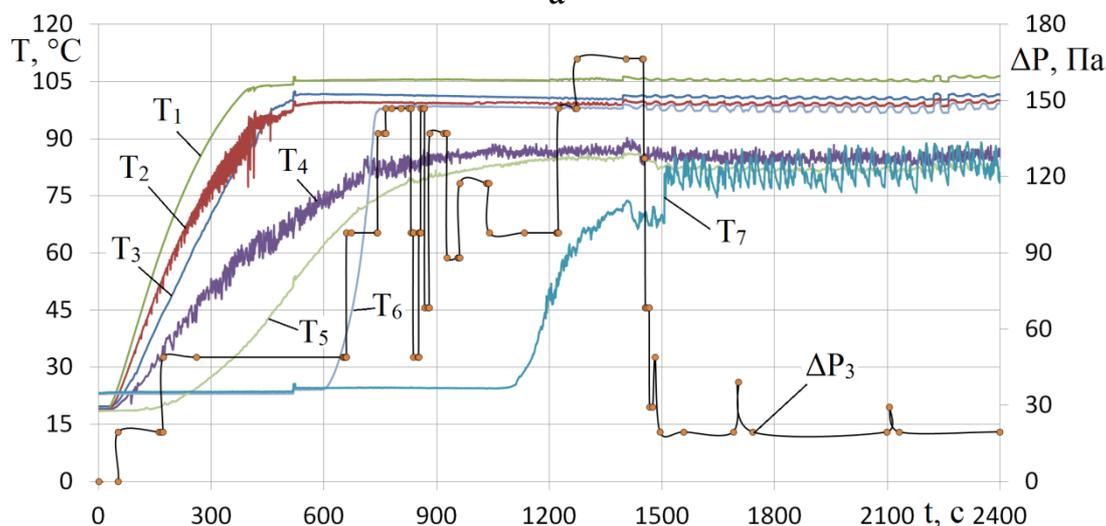


Рисунок 5. Изменение температуры и перепада давления ΔP_1 в КТТ с пропиленовым цилиндрическим конденсатором при скорости внешнего потока $w = 3,4$ м/с и тепловой мощности 100 Вт ($H=400$ мм, $T_{\text{окр}}=26$ °С).

4. Экспериментально получено, что перепад давления на полипропиленовом конденсаторе после выхода установки на стационарный режим работы составляет 100 Па (Рисунок 6, а), перепад на паропроводе – 20 Па (Рисунок 6, б). Экспериментальный перепад на паропроводе в значительной степени отличается от расчетного (~ 6 Па), полученного в предположении, что в паропроводе – однофазное паровое течение теплоносителя. Такое существенное отличие расчетного и экспериментального значений перепадов давления привело к необходимости подробного экспериментального исследования течения теплоносителя в паропроводе. Данное исследование проводилось на втором этапе, для КТТ с вакуумизацией контура.



а



б

Рисунок 6. Изменение температуры и перепада давления ΔP_2 (а) или ΔP_3 (б) в КТТ с пропиленовым цилиндрическим конденсатором при скорости внешнего потока $w = 3,4 \text{ м/с}$ и тепловой мощности 100 Вт ($H=400 \text{ мм}$, $T_{\text{окр}}=26 \text{ }^\circ\text{C}$).

Второй этап. Традиционная КТТ (с вакуумизацией контура).

На втором этапе проводились экспериментальные исследования влияния конструктивных особенностей паропровода и течения теплоносителя в нем на режим работы КТТ. Часть участка паропровода на выходе из испарителя заменялась стеклянной трубкой, что позволило визуализировать течение теплоносителя и определить причины, приводящие к колебательному режиму работы КТТ. В качестве исследуемого участка паропровода выбраны стеклянные трубки с внутренним диаметром 4 мм и 7 мм.

Результаты экспериментального исследования:

1. Обнаружено, что на всех исследованных режимах работы КТТ течение теплоносителя на выходе из испарителя парожидкостное (Рисунки 7, 8). Рабочее тело (теплоноситель) – парожидкостная смесь с разной степенью паросодержания. Проведена классификация режимов течения теплоносителя в паропроводе по режимам течения двухфазных потоков в вертикальных и горизонтальных трубах.

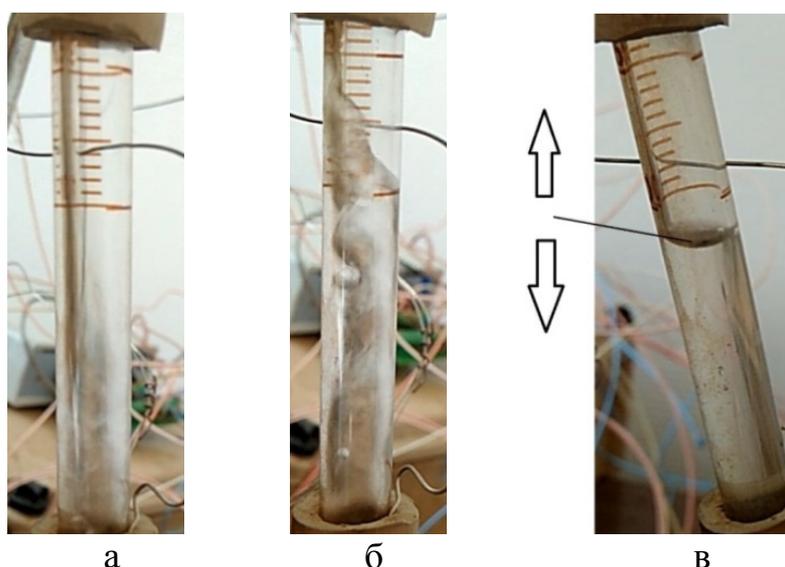


Рисунок 7. Фотографии при течении теплоносителя в паропроводе с диаметром 7 мм в зависимости от тепловой мощности: а – 110 Вт; б – 80 Вт; в – 40 Вт.

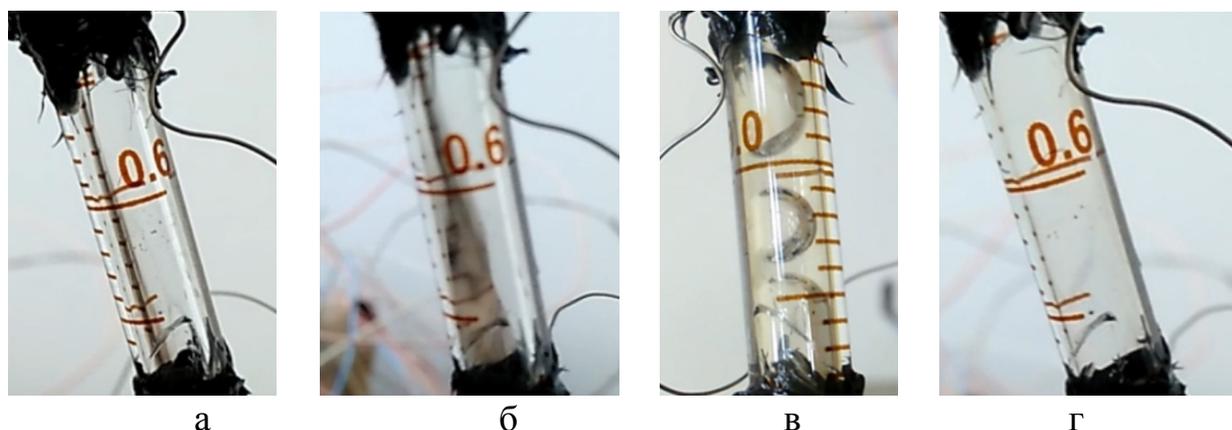


Рисунок 8. Фотографии при течении теплоносителя в паропроводе с диаметром 4 мм в зависимости от тепловой мощности: а – 110 Вт; б – 80 Вт; в – 60 Вт; г – 40 Вт.

2. Экспериментально установлено, что режим течения теплоносителя в паропроводе зависит от подводимой тепловой мощности, конструктивных особенностей паропровода и расположения конденсатора в пространстве. Обнаружено, что режим работы КТТ (Рисунки 9, 10) при низких тепловых мощностях зависит от режима течения теплоносителя в паропроводе. Впервые установлено, что при низких тепловых мощностях колебательный режим работы КТТ (Рисунок 10) наблюдается только при снаряжном режиме течения теплоносителя в паропроводе (Рисунки 8, в), при кольцевом режиме течения теплоносителя (Рисунки 7, а, б; 8, а, б) – стационарный режим работы КТТ.

3. Экспериментально установлено, что уменьшение внутреннего диаметра исследуемого участка паропровода с 7 мм до 4 мм привело к уменьшению температуры поверхности нагрева КТТ при тепловых мощностях выше 80 Вт (Рисунки 9, 10).

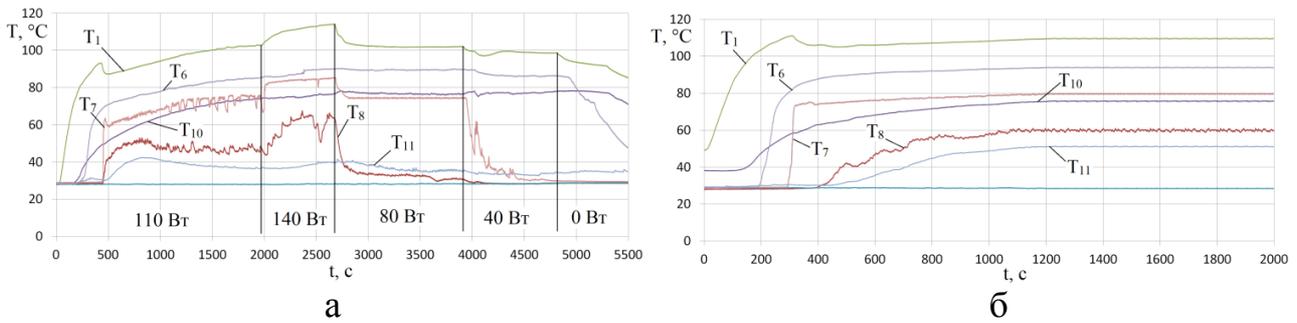


Рисунок 9. Изменения температуры в характерных точках КТТ от времени в зависимости от тепловой мощности (а) и при 110 Вт (б) ($H=400$ мм, $d_{BH}=7$ мм).

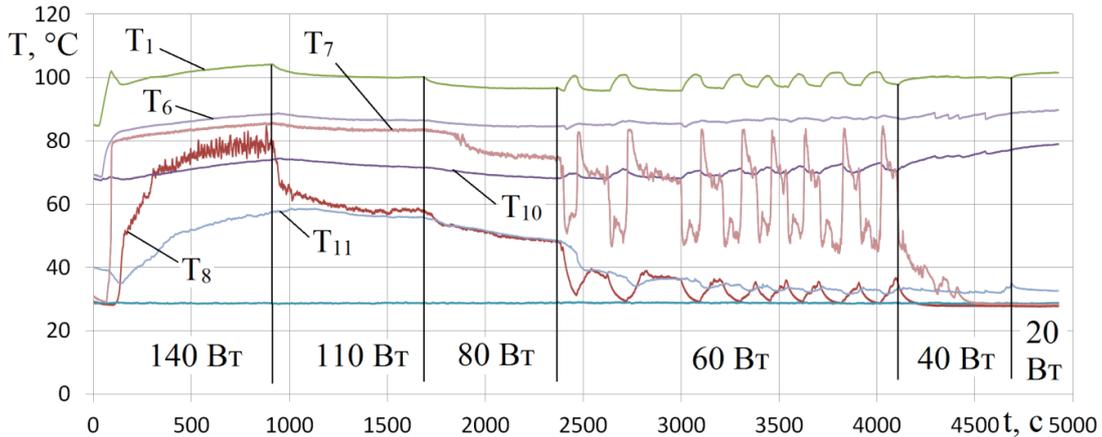


Рисунок 10. Изменения температуры в характерных точках КТТ от времени в зависимости от тепловой мощности ($H=400$ мм, $d_{BH}=4$ мм).

4. Экспериментально установлена пороговая величина подводимой тепловой мощности, ниже которой устройство устойчиво работает в режиме термосифона (Рисунки 9, а; 10). В данном случае отсутствует работа устройства как контурной тепловой трубы, т.е. запуск конденсатора не происходит, но испаритель КТТ работает в стационарном режиме. Данный режим работы устройства возможен только благодаря такой конструкции испарителя и компенсационной полости КТТ.

4. Экспериментально установлено расположение конденсатора в пространстве ($H=230$ мм), обеспечивающие стационарный режим работу в большом диапазоне тепловых мощностей (Рисунки 10, 11).

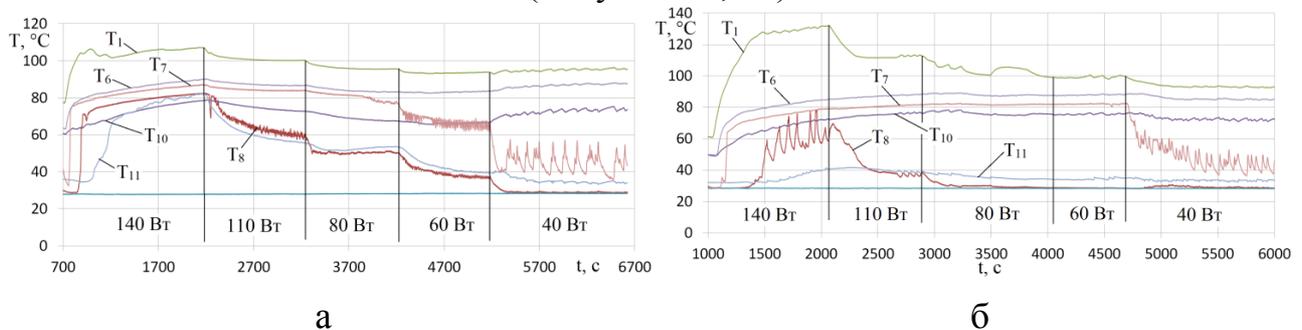


Рисунок 11. Изменения температуры в характерных точках КТТ от времени в зависимости от тепловой мощности и расположения конденсатора: а – $H=230$ мм; б – $H=105$ мм. ($d_{BH}=4$ мм).

В четвертой главе приводится описание методики теплового расчета испарителя и компенсационной полости плоской КТТ. Проведена верификация предложенной методики расчета.

Методика расчета основана на численном трехмерном моделировании теплообмена в испарителе и компенсационной полости КТТ в стационарной постановке RANS-методом (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) с помощью CFD-кода ANSYS Fluent. Предложенная методика применима только для стационарного режима работы КТТ. Расчетная область (Рисунок 12) создавалась со всеми конструктивными особенностями экспериментальной установки.

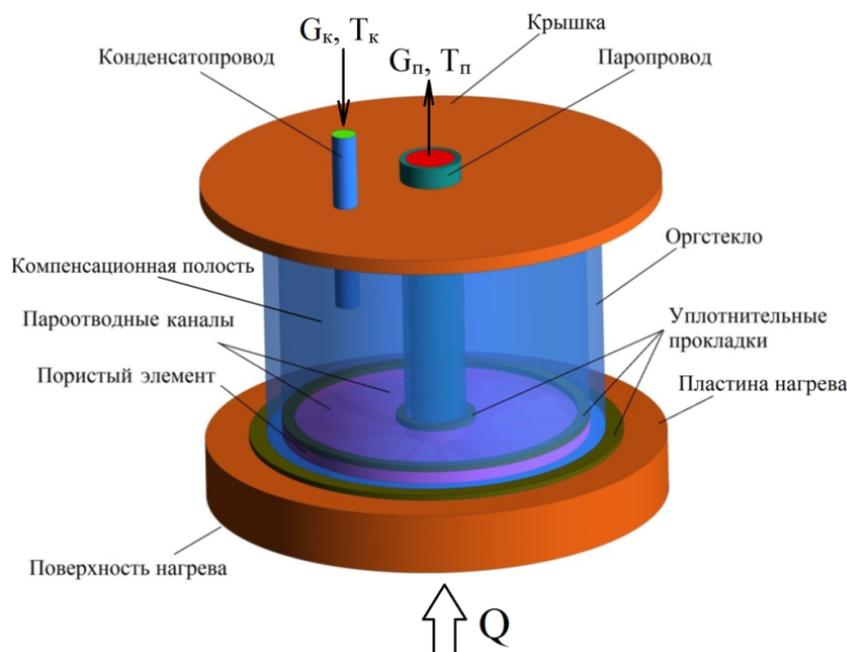


Рисунок 12. Расчетная область.

При моделировании теплового состояния испарителя и КП принимается:

1. Вся компенсационная полость заполнена жидким теплоносителем.
2. Пористый элемент полностью насыщен жидким теплоносителем.
3. Теплоноситель в паропроводе – насыщенный пар.
4. Кипение теплоносителя происходит на верхней поверхности пластины нагрева, на ребрах и на нижней поверхности пористого элемента.

Входными параметрами, определяющими тепловое состояние испарителя и КП являются экспериментально полученные температура пара на линии насыщения T_p , температура поступающего в КП конденсата T_k , температура окружающей среды $T_{ок_ср}$ и подводимая тепловая мощность Q .

В трехмерном тепловом расчете решаются уравнения теплопереноса при течении теплоносителя на участках конденсаторпровод–нижняя поверхность пористого элемента и в паропроводе (уравнения неразрывности, движения и энергии), уравнения теплопроводности для всех моделируемых элементов конструкции и испарителя. Учитывается теплообмен с окружающей средой. Пористое тело моделируется как двухкомпонентное, т.е. решаются уравнения теплопроводности для теплоносителя и для каркаса пористого тела.

Замыкающими зависимостями в зоне испарения служат эмпирические формулы коэффициентов теплоотдачи при кипении. Учитывается начало кипения и пересыхание пористого элемента.

Верификация предложенной автором методики расчета проведена на основе экспериментальных работ Чернышевой М.А. и Майданика Ю.Ф. (Рисунок 13). Наблюдается хорошее согласование расчетных данных с экспериментально полученными (Рисунок 14). Максимальное отклонение расчетной локальной температуры поверхности нагрева от экспериментальной не превышает 3 °С.

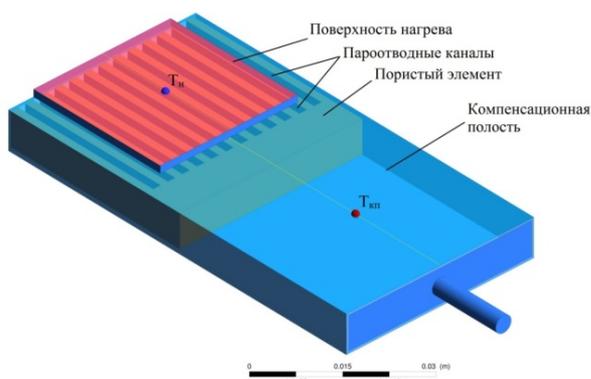


Рисунок 13. Геометрия расчетной области верификационной модели.

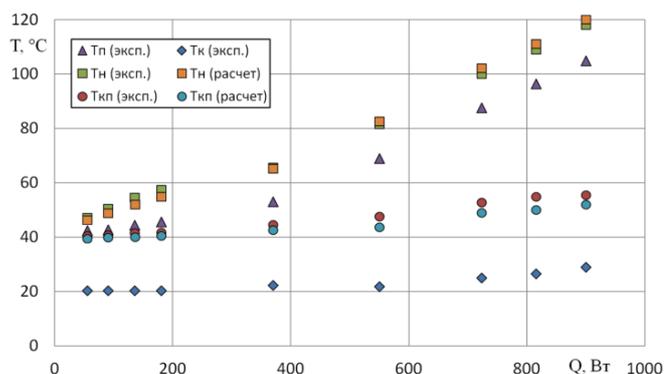


Рисунок 14. График изменения температур в характерных точках КТТ от тепловой мощности.

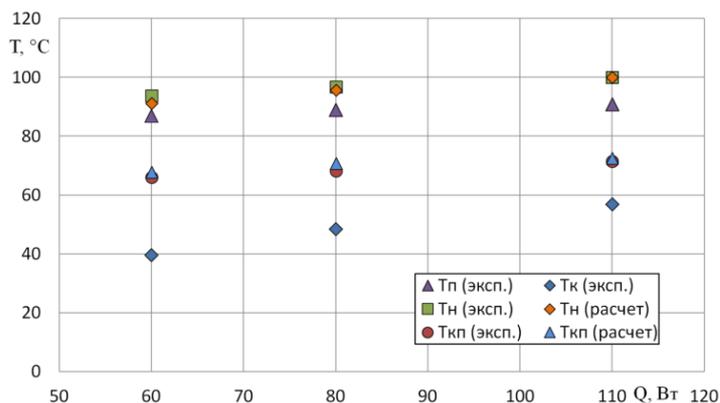
Где T_n – локальная осредненная по времени температура поверхности нагрева; $T_п$ – температура пара на выходе из испарителя; $T_{кп}$ – локальная осредненная по времени температура КП; T_k – температура конденсата на входе в КП.

В пятой главе представлены результаты теплового расчета испарителя и компенсационной полости плоской контурной тепловой трубы, экспериментально рассмотренной автором данной работы конструкции КТТ. Исследовано влияние поля массовых сил и области подвода тепловой мощности на тепловое состояние рассматриваемой модели расчета.

Выводы по результатам расчета:

1) Результаты теплового расчета испарителя и КП хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальное отклонение расчетных локальных температур от экспериментально полученных не превышает 2,5 °С (Рисунок 15).

Рисунок 15. График изменения температур в характерных точках КТТ от тепловой мощности.



2) Обнаружено, что при исследованных тепловых мощностях кипение теплоносителя наблюдается как на ребрах и верхней поверхности пластины нагрева, так и частично на поверхности пористого элемента в местах его контакта с ребрами (Рисунок 16). Кипение на всей нижней поверхности пористого элемента не наблюдается.

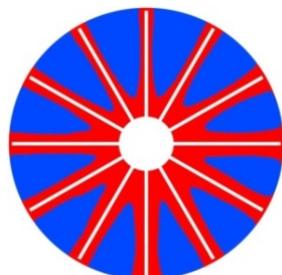


Рисунок 16. Область кипения на нижней поверхности пористого элемента при тепловой мощности $Q=110$ Вт. Область кипения показана красным цветом.

3) Исследовано влияние поля массовых сил на результат теплового расчета. Обнаружено существенное влияние данного фактора на результат расчета. Учет естественной конвекции теплоносителя приводит к выравниванию температуры жидкого теплоносителя в КП (Рисунок 17), к уменьшению области кипения на нижней поверхности пористого элемента, к увеличению температуры крышки.

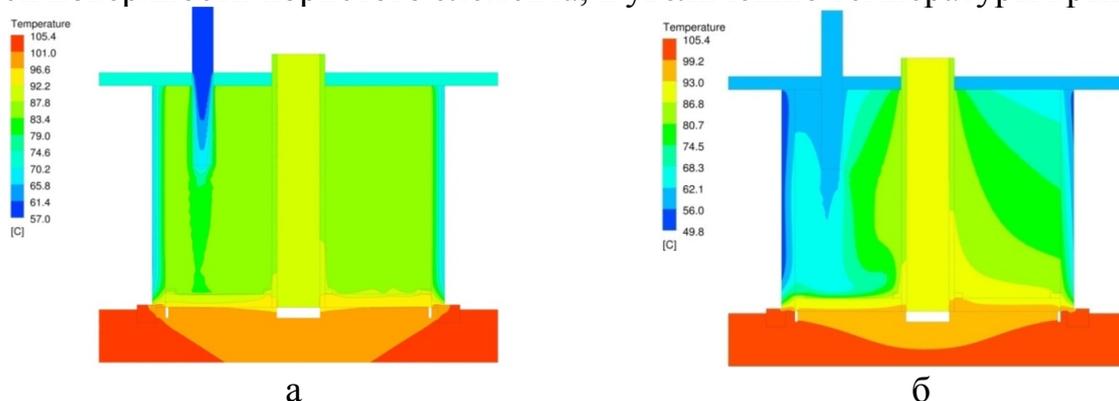


Рисунок 17. Поле температуры в продольном сечении при тепловой мощности $Q=110$ Вт: а – с учетом поля массовых сил; б – без учета поля массовых сил.

4) Экспериментальным и расчетным способами обнаружена значительная температурная неравномерность поверхности нагрева. Максимальная температура и температурная неравномерность поверхности нагрева КТТ сильно зависит от способа подвода тепловой мощности (Рисунок 18). Расчетным способом найдено, что область подвода, обеспечивающая равномерную температуру поверхности нагрева (Рисунок 19, б) и более равномерное испарение теплоносителя в испарителе, соответствует размерам зоны испарения.

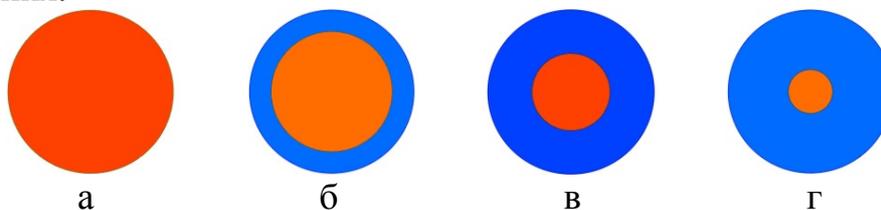


Рисунок 18. Область подвода тепловой мощности равной 110 Вт: а – Вариант №1; б – Вариант №2; в – Вариант №3; г – Вариант №4.

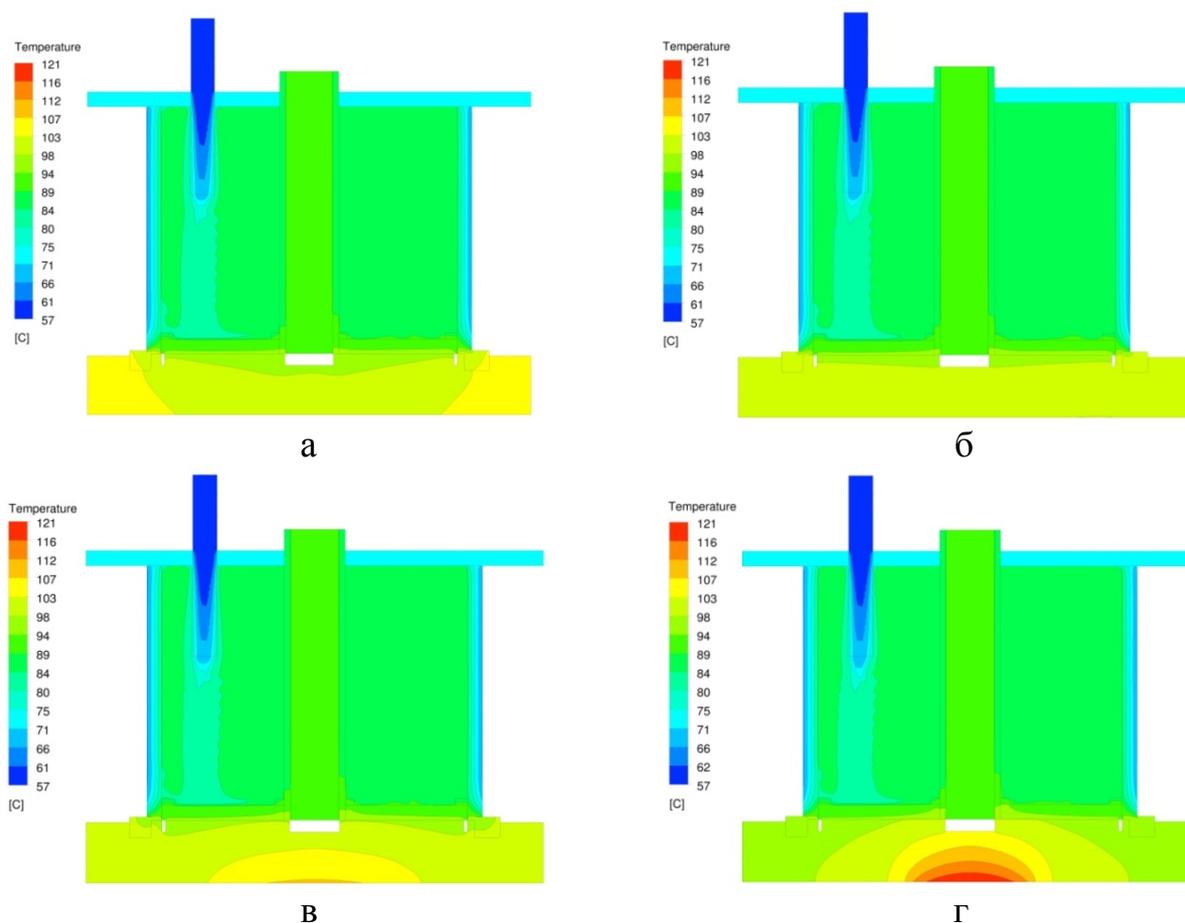


Рисунок 19. Температурное поле в продольном сечении в зависимости от варианта подвода тепловой мощности $Q=110$ Вт: а – Вариант №1; б – Вариант №2; в – Вариант №3; г – Вариант №4.

Основные результаты и выводы:

1. Предложенная конструкция КТТ (с плоской поверхностью нагрева и с центральным расположением пароотвода) обеспечивает устойчивую работу устройства в широком диапазоне подводимой мощности.
2. На всех исследованных режимах работы КТТ обнаружено двухфазное течение теплоносителя в паропроводе. Рабочее тело (теплоноситель) – парожидкостаная смесь с разной степенью паросодержания.
3. Обнаружено, что режим течения теплоносителя в паропроводе зависит от подводимой тепловой мощности, конструктивных особенностей паропровода, расположения конденсатора в пространстве.
4. Экспериментально установлено, что режим работы КТТ при низких тепловых мощностях зависит от режима течения теплоносителя в паропроводе.
5. Впервые показано, что при низких тепловых мощностях колебательный режим работы КТТ наблюдается только при снарядном режиме течения теплоносителя в паропроводе.
6. Экспериментально обнаружено, что при низких тепловых мощностях устройство устойчиво работает в режиме термосифона. Данный режим работы устройства возможен только благодаря такой конструкции испарителя и компенсационной полости КТТ. Экспериментально установлена пороговая

величина подводимой тепловой мощности, ниже которой КТТ работает в режиме термосифона.

7. На основании верификационного теплового расчета испарителя и КП предложенную методику можно рекомендовать для расчета задач такого типа.

8. Расчетным способом установлено, что при исследованных тепловых мощностях кипение на поверхности пористого элемента наблюдается только в местах контакта с ребрами.

9. Показана необходимость учета поля массовых сил при тепловом расчете испарителя и компенсационной полости КТТ.

10. Расчетным способом установлено, что область подвода, обеспечивающая минимальную и равномерную температуру поверхности нагрева и равномерное испарение теплоносителя в испарителе, соответствует размерам зоны испарения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В., Якомаскин А.А. Диагностика температурного поля контурной тепловой трубы с открытой компенсационной полостью // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2014. №10. С. 55-61. (1,13 п.л./0,5 п.л.).

2. Афанасьев В.Н., Недайвозов А. В. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик контурной тепловой трубы с открытой компенсационной полостью // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2016. № 11. С. 38-54. DOI: 10.7463/1116.0849572. (1,04 п.л./0,5 п.л.).

3. Недайвозов А.В., Афанасьев В.Н. Трехмерное численное моделирование испарителя и компенсационной полости контурной тепловой трубы в стационарной постановке // Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2017. №7. С. 45-62. DOI: 10.7463/0717.0001276. (1,1 п.л./0,5 п.л.).

4. Афанасьев В.Н., Якомаскин А.А., Недайвозов А.В. Температурное поле контурной тепловой трубы с открытой компенсационной полостью // Тез. докл. шестой Российской Национальной Конференции по Теплообмену (РНКТ-6). М. 2014. Т.3. С.171-172. (0,12 п.л./0,06 п.л.).

5. Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В., Якомаскин А.А. Экспериментальное исследование процессов в «контурных» тепловых трубах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. «Машиностроение». 2014. №2. С. 44-61. (1,1 п.л./0,4 п.л.).

6. Недайвозов А.В. Экспериментальное определение температур в характерных узлах КТТ с открытой компенсационной полостью // Тез. докл. XX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках». г. Звенигород, Россия. 2015. С. 225-226. (0,12 п.л.).

7. Афанасьев В.Н., Недайвозов А.В. Экспериментальное исследование режимов работы плоской контурной тепловой трубы // Машиностроение и компьютерные технологии. 2019. №1. С. 1-12. DOI: 10.24108/0119.0001448. (0,78 п.л./0,4 п.л.).