

На правах рукописи



ЗАЙНУЛЛИНА ЭЛЬЗА РАФИСОВНА

**ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ
В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА
НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ**

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

Научный руководитель доктор технических наук, доцент,
Митяков Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты **Кузма-Кичта Юрий Альфредович**,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», профессор кафедры инженерной теплофизики.
Митропов Владимир Викторович,
кандидат технических наук, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», старший преподаватель факультета низкотемпературной энергетики.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева-КАИ», г. Казань

Защита диссертации состоится 10 декабря 2019 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 130.

С диссертацией можно ознакомиться на сайте www.spbstu.ru и в библиотеке СПбПУ.

Ваши отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, СПбПУ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.06.

Автореферат разослан «___» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.06,
к.т.н., доцент



В.А. Талалов

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертационного исследования. Конденсаторы с охлаждаемыми трубами – распространённые теплообменники в энергетике, холодильной технике, химических технологиях и других областях. Их совершенствование, оптимизация конструкции и режимных параметров, унификация и стандартизация, перевод на новые рабочие тела – вот неполный перечень задач, решение которых связано с исследованием течения конденсата и теплообменом при конденсации.

Несмотря на чрезвычайно обширные и глубокие исследования физических процессов при конденсации, до последнего времени отсутствовали работы, основанные на прямом измерении местной плотности теплового потока на поверхностях теплообмена. Появление разработанных в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого градиентных датчиков теплового потока позволило реализовать возможности градиентной теплометрии в исследовании теплообмена при конденсации водяного пара на наружной поверхности вертикальных, наклонных и горизонтальных труб. Приоритетный характер этих работ, а также сочетание их фундаментальных и прикладных результатов делает задачу исследования **актуальной**.

Степень разработанности научной проблемы. Анализ литературных источников показывает, что модели конденсации разработаны достаточно детально; при этом основой является модель В. Нуссельта (1916 г.), дополненная поправками на волнообразование, изменение физических свойств с температурой, учётом ориентации поверхностей и т.д. Однако часть предложенных моделей использует параметры, контроль которых не всегда возможен, а зависимость от термических параметров состояния достаточно сильна.

Многочисленные экспериментальные работы затрагивают физическую сторону процесса, позволяют контролировать гидродинамические процессы в конденсатной плёнке, формирование различных зон теплообмена, вклад сил поверхностного натяжения, гравитации и т.д. При этом экспериментальных работ,

посвящённых оценке местной плотности теплового потока на поверхности теплообмена, крайне мало. В их числе можно выделить исследования Д. А. Лабунцова, Г. Вюшна, К. Д. Воскресенского, П. Л. Капицы и С. П. Капицы, Г. Н. Кружилина, В. В. Ягова, К. Хасана и М. Якоба, В. Камминга, С. А. Нада и М. С. Хусейна, М. И. Брайнина, М. Трэла и Дж. Зембика, А. Г. Шейнкмана и В. И. Линецкого, А. М. Усачёва, Б. С. Петухова, С. С. Кутателадзе и А. И. Шренцеля, И. И. Гогонина и А. Р. Дорохова, Дж. К. Чжанга и Л. Ванга, Е. А. Салеха и С. Дж. Ормистона, Ч. К. Чена и И. Т. Линга, Дж. Б. Тене и А. К. Мюэллера, Т. Гарретта, О. П. Кректунова и А. С. Савуса, М. М. Шварца и др. Это связано, в первую очередь, с дефицитом идей и решений в области теплотметрии – измерения плотности теплового потока на поверхности теплообмена.

Цель и задачи диссертационного исследования. Целью работы является применение метода градиентной теплотметрии к исследованию теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности ориентированной различным образом трубы, оценка его адекватности, точности, возможностей и перспектив использования. При этом необходимо решить следующие основные задачи.

1. Разработать, изготовить и испытать экспериментальную установку, позволяющую измерять местную плотность теплового потока при конденсации пара на наружной поверхности охлаждаемой изнутри трубы.

2. Оценить неопределённость измерений местной плотности теплового потока и местного коэффициента теплоотдачи (КТО).

3. Исследовать теплообмен при конденсации пара на поверхности вертикальной, наклонной и горизонтальной трубы.

4. Сопоставить полученные результаты с расчётными и экспериментальными данными других исследователей.

5. Рассмотреть оптимизацию теплообмена при конденсации на трубах путём изменения угла их наклона.

6. Оценить применимость градиентной теплотметрии к решению задач теплообмена при конденсации и совершенствованию конструкций и режимов работы конденсаторов.

Объект исследования. Теплообмен при конденсации пара на наружной поверхности вертикальных, горизонтальных и наклонных труб.

Предмет исследования. Градиентная теплотметрия как метод прямого измерения местной плотности теплового потока при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Основой исследования послужила модель теплообмена при конденсации В. Нуссельта и работы отечественных и зарубежных исследователей, посвящённые конденсации пара на наружной поверхности труб с различной пространственной ориентацией. В работе реализованы методы и средства градиентной теплотметрии, ранее применённые для изучения различных видов теплообмена в однофазных системах.

В диссертации реализована принципиально новая технология, основанная на прямом измерении местной плотности теплового потока с помощью уникальных первичных преобразователей – градиентных датчиков теплового потока (ГДТП). Метод предусматривает одновременное в нескольких точках измерение местной плотности теплового потока и температуры поверхности теплообмена. В сочетании с известной (по давлению насыщения) температурой пара это даёт возможность рассчитать местные, а затем и средние КТО, а также выявить распределение КТО по периметру и длине трубы при различной её ориентации. В работе реализована оригинальная схема обработки сигналов ГДТП и термопар, сводящая к минимуму влияние внешних электрических помех.

Информационная база исследования. В работе использованы монографии, статьи и другие материалы авторов, часть которых упомянута в разделе «Степень разработанности научной проблемы». Особое внимание уделено работам по градиентной теплотметрии, развиваемой в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого С. З. Сапожниковым, В. Ю. Митяковым, А. В. Митяковым и др.

Обоснованность и достоверность результатов исследования. В работе используются фундаментальные соотношения теории теплообмена, апробированные модели теплообмена при конденсации и надёжные экспериментальный

данные других исследователей. Оценены неопределённости, с которыми удалось измерить и рассчитать местную плотность теплового потока и КТО. Оценены также неопределённости, связанные с аналоговым и цифровым преобразованием сигналов ГДТП и термопар. Результаты исследований теплообмена при конденсации на вертикальных и горизонтальных трубах соответствуют расчётам по модели В. Нуссельта. Данные по теплообмену на наклонных трубах представляют самостоятельную ценность и имеют приоритетный характер.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тема диссертации соответствует двум пунктам паспорта специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника для технических наук, а именно:

п.6. Экспериментальные исследования, физическое и численное моделирование процессов переноса массы, импульса и энергии в многофазных системах и при фазовых превращениях.

п.9. Разработка научных основ и создание методов интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты.

Научная новизна результатов исследования. В работе впервые применены первичные преобразователи и методика градиентной теплотметрии к исследованию теплообмена при конденсации.

На защиту выносятся:

- использование градиентной теплотметрии для исследования теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы;
- совмещение градиентной теплотметрии и термометрии для оценки распределения местных КТО по периметру и длине трубы, а также для определения среднего КТО для трубы, ориентированной в пространстве различным образом;
- результаты экспериментального исследования плотности теплового потока и КТО при конденсации пара на наружной поверхности трубы;
- экспериментально установленный оптимальный угол наклона труб, на поверхности которых конденсируется насыщенный водяной пар.

Теоретическая и практическая значимость исследования. Полученные в работе данные – в совокупности с оценкой их неопределённости – позволяют

тестировать модели конденсации и оценивать вклад конструктивных и режимных параметров в работу конденсаторов. Градиентная теплометрия позволяет экспериментально определять местные и средние КТО при переходе на новые рабочие тела и другие режимные параметры. Новый подход важен при оценке предлагаемых технических решений при создании и реконструкции конденсаторов различного назначения.

Личный вклад автора выразился в формировании основного методического подхода (градиентной теплометрии), разработке, создании и применении двух модификаций экспериментальных стендов, проведении опытов и обработке их результатов, представлении новых экспериментальных данных по плотности тепловых потоков и КТО при конденсации пара на трубах с различной ориентацией.

Апробация результатов исследования.

Отдельные результаты и разделы работы, а также диссертация в целом докладывались и обсуждались:

– на заседаниях и научных семинарах кафедры «Теплофизика энергетических установок» Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (2015-2019);

– на международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики» СПТЭ – 2017 в НИУ «МЭИ», Москва;

– на XX Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 24 – 29 мая 2015, Звенигород;

– на XXI Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 22 – 26 мая 2017, Санкт-Петербург;

– на седьмой Российской национальной конференции по теплообмену (РНКТ–7), 22 – 26 октября 2018, Москва;

– на XXII Школе-семинаре молодых учёных и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 20 – 24 мая 2019, Москва.

Результаты работ представлены в 14 публикациях, включая 2 статьи в журналах из перечня ВАК и 4 статьи, имеющие индекс Scopus.

Основные положения и результаты исследования

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы его цель, задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов, полученных в диссертации.

В **главе 1** представлен обзор литературы, посвящённый моделям теплообмена при конденсации пара на трубах различной ориентации, а также экспериментальному исследованию теплообмена с использованием термометрии и теплотометрии. Выявлены недостатки существующих методов и установок, показана необходимость нового подхода, связанного с прямым измерением местной плотности теплового потока на поверхности теплообмена с помощью ГДТП. Глава 1 определяет направление собственных исследований, их цель и задачи.

Глава 2 посвящена методике, технике и метрологии эксперимента. Описана методика и техника градиентной теплотометрии с использованием гетерогенных и монокристаллических ГДТП. Рассмотрена термометрия на основе стандартных и полуюскусственных термопар, конструкция пилотного и модернизированного вариантов установки. Предложен новый подход к обработке сигналов ГДТП, существенно ослабляющий вклад внешних помех. Выполнена метрологическая оценка показателей, определяемых экспериментально и рассчитываемых по данным экспериментов.

Действие ГДТП основан на поперечном эффекте Зеебека (рисунок 1, а): в сечениях датчика, нормальных вектору внешнего теплового потока, возникает поперечная разность температур и генерируется пропорциональная этой разности термоЭДС.

ГДТП генерирует термоЭДС E , линейно связанную со средней плотностью теплового потока, проходящего через его сечение:

$$E = S_0 \cdot F_d \cdot q, \text{ мВ},$$

где S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт;

F_d – площадь ГДТП в плане, м²;

q – плотность теплового потока, Вт/м².

ГДТП выполняют на основе природных анизотропных материалов (в первую очередь, монокристаллического висмута чистотой 0,9999), а также из косослойных композитов, в структуре которых чередуются слои металлов, сплавов и полупроводников. Композитные ГДТП получили название гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП).

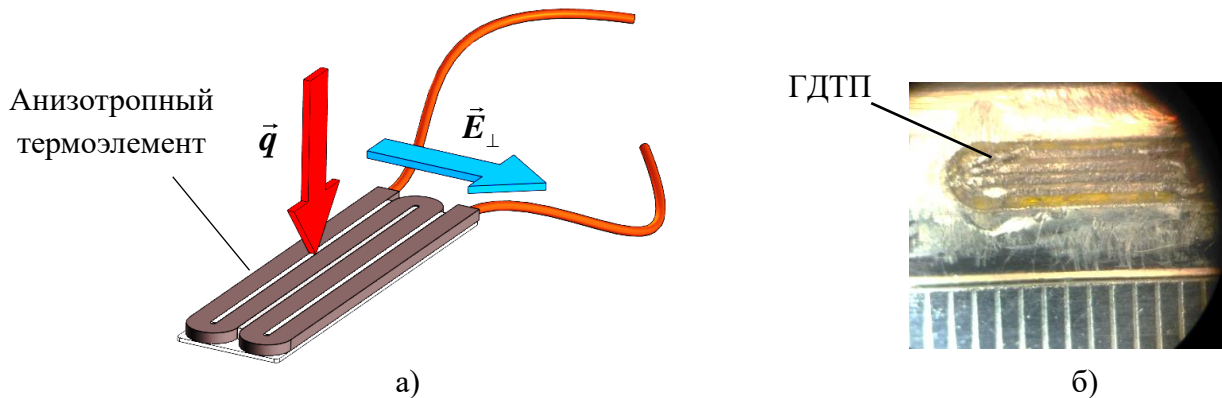


Рисунок 1 – Поперечный эффект Зеебека (а) и монтаж ГДТП в выемке на трубе (б)

Значительная (10 мм) ширина ГГДТП, использованных в пилотной установке, и низкий уровень их сигнала заставили перейти на ГДТП из монокристаллов висмута. В модернизированной установке на трубе размещались 5 ГДТП размерами в плане $2,3 \times 10,5$ мм при толщине 0,3 мм, каждый из которых представлял батарею из четырёх анизотропных термоэлементов. Монтаж ГДТП заподлицо с поверхностью трубы показан на рисунке 1, б.

Схема рабочего участка установки представлена на рисунке 2.

В качестве основного элемента использована электросварная труба из нержавеющей стали 12Х18Н9Т с зеркальной поверхностью длиной 1300 мм диаметром 20 мм, толщиной стенки 2 мм. Наружная оболочка выполнена из армированного резинового рукава длиной 900 мм, наружным диаметром 65 мм, тол-

щиной стенки 5 мм. Длина зоны теплообмена составляет 800 мм. Труба фиксируется в кожухе с помощью двух резиновых уплотнителей диаметром 55,5 мм и толщиной 28 мм. В резиновых уплотнителях выполнены отверстия для подвода

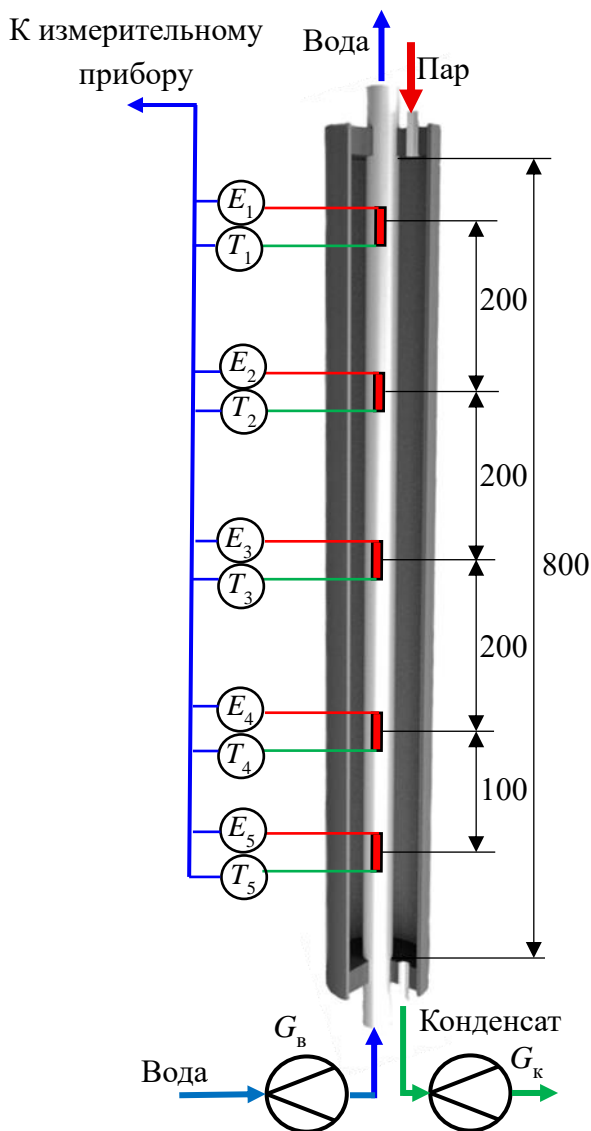


Рисунок 2 – Рабочий участок модернизированной установки

пара в экспериментальный участок и отвода конденсата. Через верхний уплотнитель выведены провода от ГДТП и полупроводниковых термодатчиков, через нижний сливается конденсат.

Для уменьшения числа термоэлектродов и ослабления их влияния на течение конденсата в модернизированной установке использованы полупроводниковые термопары медь – нержавеющая сталь. Для фиксации всех проводов в зазоре между трубой и кожухом установлены две струны из стальной проволоки диаметром 3 мм, отведённые от поверхности теплообмена на 7 мм.

Микровольтовый уровень сигнала ГДТП находится на уровне внешних помех комплекса National Instruments. Для качественной обработки показаний ГДТП был создан аналоговый многоканальный регистратор на базе светолучевого осциллографа Н145.

При модернизации осциллографа систему «источник света + система зеркал» заменили на лазерный модуль, а фотобумагу – на удалённую шкалу. На зеркало гальванометра направлялся лазерный луч, который отражался от зеркала гальванометра (изменявшего положение в зависимости от сигнала ГДТП), и про-

ецировался на удалённую шкалу. Запись сигналов производилась на видеокамеру Casio Exilim EX-FH20 при частоте 30 кадров в секунду; видео запись обрабатывалась в программе ImageG в плагине TrackMate.

По результатам строились зависимости плотности теплового потока от времени – временные теплограммы – свободные от шумовой составляющей.

Расчёт неопределённости выполнен по ГОСТ 34100.-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Неопределённость измерения». Относительная неопределённость измеренной плотности теплового потока составила 7,5%, а расчёта КТО 8,4 %. Анализ показывает, что метрологический уровень эксперимента соответствует его цели и задачам.

Глава 3 посвящена результатам экспериментов и их обсуждению. Последовательно рассмотрены опыты на вертикальных, горизонтальных и наклонных трубах. Обсуждаются полученные результаты и перспективы градиентной теплометрии при исследовании конденсации.

На рисунке 3 показаны характерные временные теплограммы, полученные на вертикальной трубе. Временные теплограммы подтверждают существенную нестационарность процесса конденсации, так как все ГДТП фиксируют пульсации плотности теплового потока. По показаниям термопар средняя по длине трубы температура стенки 78 °С. По результатам эксперимента рассчитан средний по длине вертикальной трубы КТО $\bar{\alpha}^{\text{эксп}} = 6,06 \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, что на 0,66 % отличается от значения, полученного по формуле Нуссельта.

На рисунке 4 представлены результаты, полученные на горизонтальной трубе. Для обобщения результатов использована безразмерная местная плотность теплового потока – $\tilde{q} = q(\varphi)/q(0)$, где $q(\varphi)$ – местная плотность теплового потока вблизи образующей с азимутальным углом φ ; $q(0)$ – местная плотность теплового потока вблизи верхней (лобовой) образующей с азимутальным углом $\varphi = 0^\circ$.

Средний по периметру горизонтальной трубы КТО составил $\bar{\alpha}_{\text{гор}}^{\text{эксп}} = 5,54 \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Расчёт по формуле В. Нуссельта даёт значение, отличающееся на 4,3 % от полученного в эксперименте.

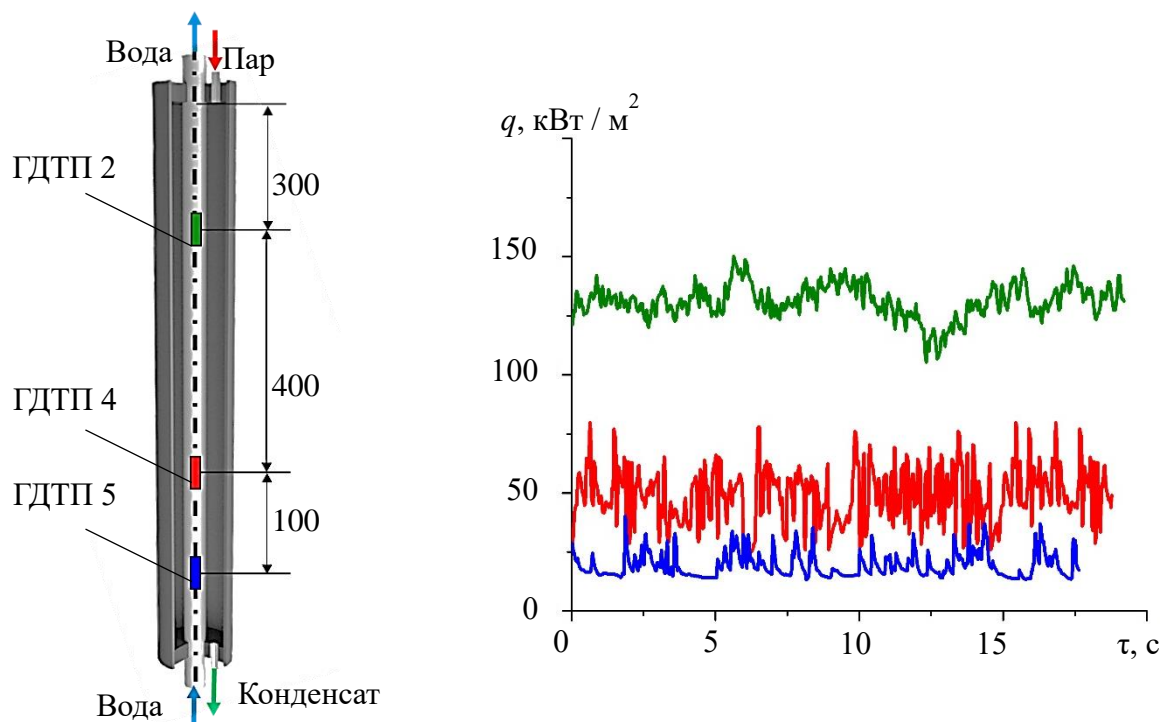


Рисунок 3 – Временные теплограммы, полученные при конденсации на вертикальной трубе

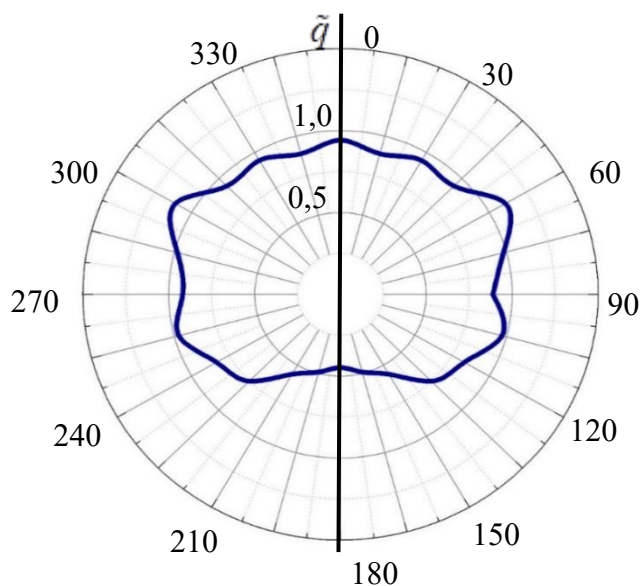


Рисунок 4 – Распределение местной плотности теплового потока по поверхности горизонтальной трубы

Угловые теплограммы, полученные на трубе, отклонённой от вертикали на угол ψ , представлены на рисунках 5, 6.

$\tilde{\alpha} = \alpha(\varphi) / \alpha(0)$, где $\alpha(\varphi)$ – значение местного КТО вблизи образующей с азимутальным углом φ ; $\alpha(0)$ – значение местного КТО вблизи верхней образующей с азимутальным углом $\varphi = 0^\circ$.

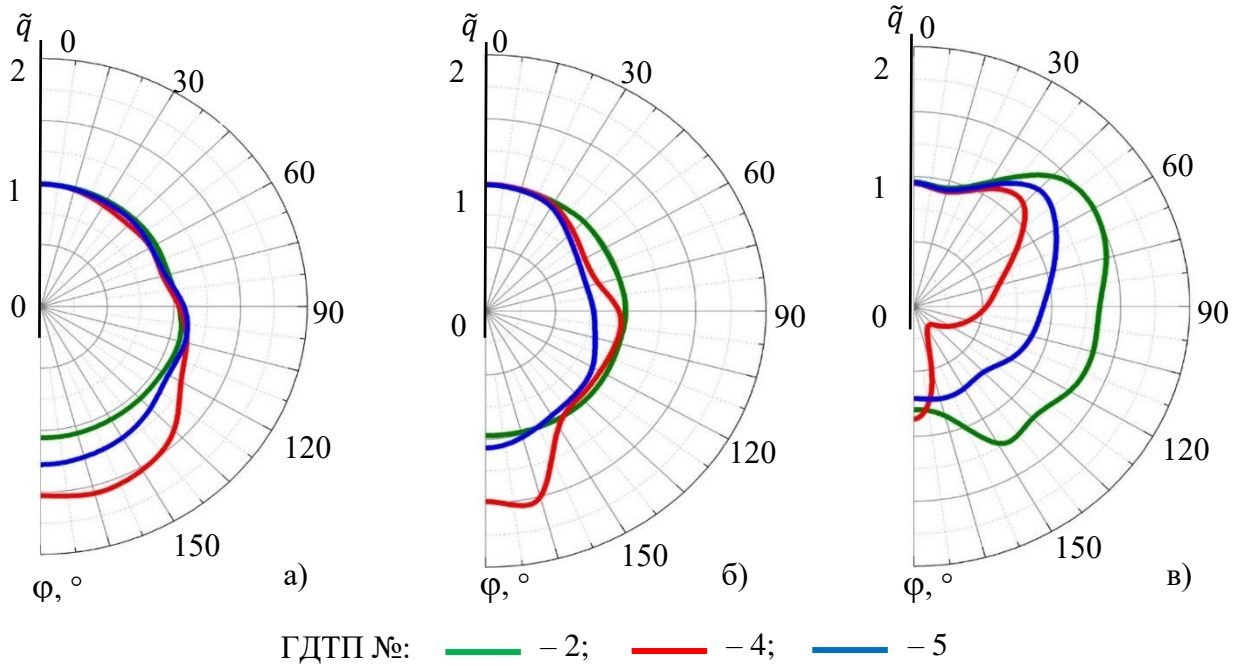


Рисунок 5 – Угловые теплограммы для трубы, наклонённой на угол ψ , равный:
а – 30° , б – 60° , в – 80°

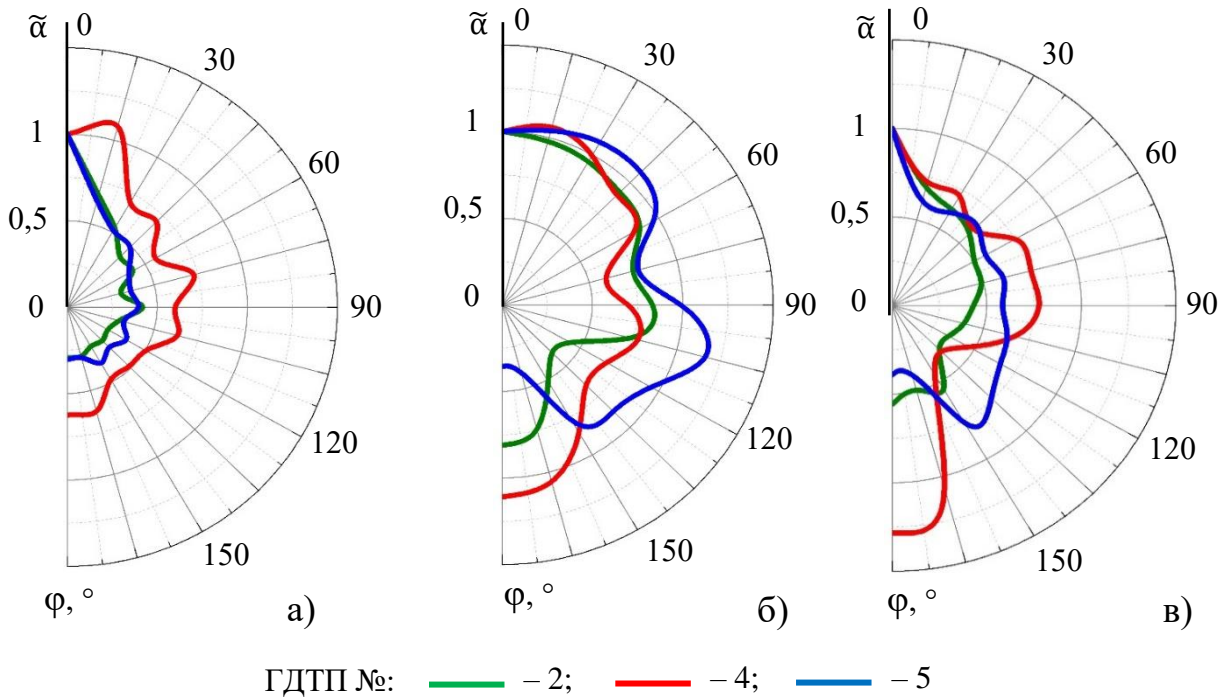


Рисунок 6 – Распределения КТО по поверхности трубы, наклонённой на угол ψ , равный:
а – 20° , б – 50° , в – 70°

На рисунках 5, 6 видна существенная несимметрия угловых диаграмм, качественно соответствующая картине течения конденсатной плёнки с образованием поддонной зоны.

На рисунке 7 показано изменение плотности теплового потока (рисунк 7, а) и среднего КТО (рисунк 7, б) в зависимости от угла наклона трубы ψ .

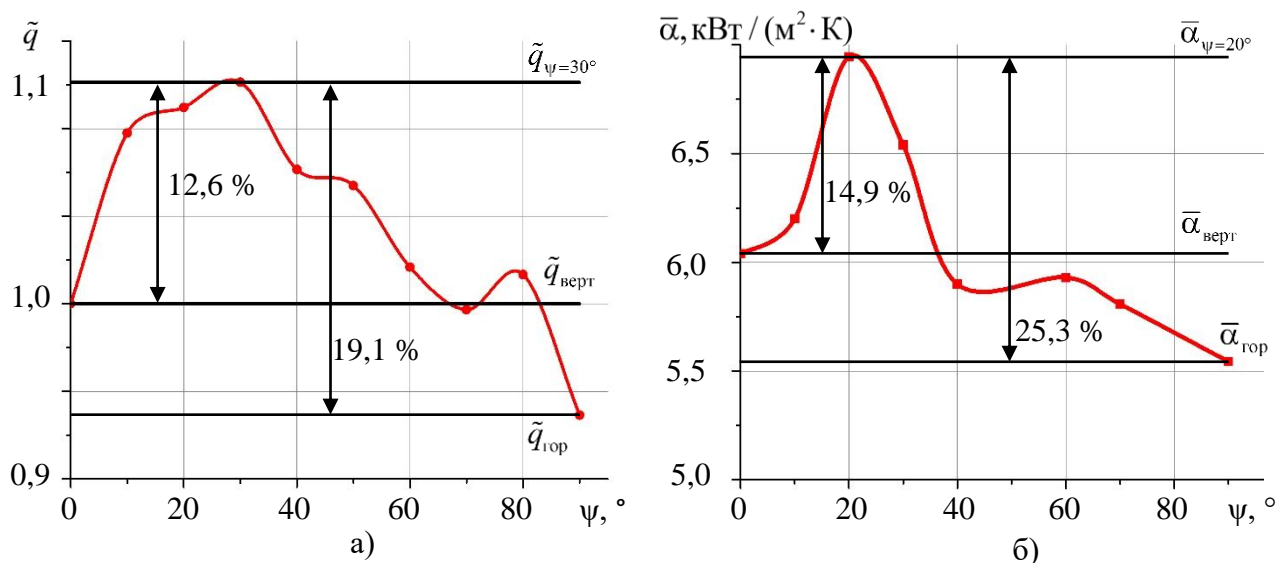


Рисунок 7 – Изменение средней относительной плотности теплового потока (а) и среднего КТО (б) для наклонной трубы

Наибольшее значение среднего и КТО достигается при наклоне трубы на 20° и составляет $\bar{\alpha} = 6,94 \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, превышая значение, полученное на вертикальной трубе, на 14,9%; а на горизонтальной трубе – на 25,3 %.

Метод градиентной теплотметрии позволяет построить распределения местной плотности теплового потока и местного КТО по периметру и длине трубы при любой её ориентации, от вертикальной до горизонтальной и выявить оптимальный угол наклона трубы. Применение градиентной теплотметрии перспективно в прикладных задачах, связанных с созданием и совершенствованием конденсаторов различного назначения.

Заключение

1. Первый опыт применения градиентной теплотметрии к исследованию теплообмена при конденсации насыщенного водяного пара на наружной поверхности трубы показал адекватность и высокую информативность такого подхода.
2. Разработана, создана и успешно использована в эксперименте установка для градиентной теплотметрии при конденсации, позволяющая прямым методом измерить местную плотность теплового потока на поверхности теплообмена при любой ориентации трубы.

3. Показано, что относительная неопределённость, с которой установлены значения местной плотности теплового потока, составляют 7,5 %, а неопределённость расчёта местного КТО – 8,4 %. Это позволяет считать градиентную теплотметрию надёжным и достоверным способом исследования теплообмена при конденсации.
4. Исследован теплообмен при конденсации водяного пара на вертикальной, наклонной и горизонтальной трубе. Установлено соответствие результатов, полученных на вертикальной и горизонтальной трубе, модели В. Нуссельта. Результаты, полученные на наклонной трубе, имеют приоритетный характер.
5. Установлен оптимальный по КТО угол наклона трубы, который для реализованных в эксперименте условия (100 °С, 1 ата) составляет 20° от вертикали. При этом средний КТО удаётся повысить на 14 – 25%.
6. Градиентная теплотметрия найдёт применение как в теплофизическом эксперименте, так и в прикладных задачах, связанных с созданием и совершенствованием конденсаторов различного назначения.

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в следующих публикациях:

1. Зайнуллина Э.Р. Исследование явления обратной конденсации методами градиентной теплотметрии / А. В. Башкатов, А. С. Косолапов, Э. Р. Зайнуллина, В. В. Сероштанов, С. З. Сапожников // Приборы. - 2015. - № 11.
2. Zainullina, E.R. Gradient heat flux measurement while researching of saturated water steam condensation / V Y Mityakov, S Z Sapozhnikov, E R Zainullina, A Y Babich, O A Milto, K S Kalmykov // Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - Volume. 891(1).
3. Zainullina, E.R. Gradient heat flux measurement in condensation study at inner and outer surfaces of the pipe / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. Y. Babich, E. R. Zainullina// Journal of Physics: Conference Series. - 2018. - Volume 1105 (1).
4. Zainullina, E.R. Study of condensation at the surfaces of tube with gradient heat flux measurement / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. Y. Babich, E. R. Zainullina // MATEC Web of Conferences. - 2018. - Volume 245.
5. Зайнуллина Э.Р. Исследование теплообмена при конденсации на поверхностях труб методом градиентной теплотметрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков,

А. В. Митяков, А. Ю. Бабич, Э. Р. Зайнуллина // Письма в ЖТФ. - 2019. - том 45, вып.7.

6. Zainullina, E.R. The Study of Heat Flux Measurement for Heat Transfer during Condensation at Pipe Surfaces / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. V. Mityakov, A. Y. Babich, E. R. Zainullina // Technical Physics Letters. - 2019. - Volume 45 (4).