

На правах рукописи



ПАВЛОВ АНДРЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ
ПРИ КИПЕНИИ ВОДЫ И ВЗВЕСЕЙ
НА ПЕРЕГРЕТЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ**

1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидат технических наук

Санкт-Петербург

2025

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

Научный руководитель: **Сапожников Сергей Захарович**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Овсянник Анатолий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика и экология» учреждения образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого», Республика Беларусь, г. Гомель.

Митропов Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

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

Защита состоится «12» марта 2025 года в 14 часов 00 минут на заседании Диссертационного совета У.1.3.14.07 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Академическое, ул. Политехническая, д.29 литер Б, Механический корпус, аудитория 14.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета У.1.3.14.07
к.т.н.



Сероштанов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основным методом исследования теплообмена при кипении является термометрия, однако лишь по температурам поверхности и жидкости определить местную плотность теплового потока не удастся.

Градиентная теплотометрия позволяет измерить местную плотность теплового потока. В сочетании с термометрией и высокоскоростной визуализацией она дает новые возможности при исследовании теплообмена на поверхностях сложной формы, в оптически непрозрачных средах и при решении других задач.

Градиентная теплотометрия позволяет уточнить или доработать существующие расчетные методики и обеспечить мониторинг кипения в энергетических установках и других устройствах.

Степень разработанности темы исследования. Применение градиентной теплотометрии в изучении кипения началось в Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого в 2018 году. Пилотные опыты продемонстрировали информативность нового метода и показали, в частности, возможности градиентной теплотометрии в исследовании теплообмена при кипении в оптически непрозрачных средах.

Цель и задачи работы. Цель работы – инновационное использование градиентной теплотометрии в исследовании кипения жидкостей со взвесями микро- и наночастиц на перегретых поверхностях. Необходимо решить следующие задачи.

1. Выполнить обзор средств и методов, применяемых или пригодных к применению при исследовании теплообмена при кипении в большом объеме.
2. Разработать технологию, создать и отградуировать гетерогенные градиентные датчики теплового потока, пригодные для условий эксперимента, оценить их метрологические возможности.
3. Создать экспериментальный стенд для применения комплексной методики, включающей градиентную теплотометрию, термометрию и высокоскоростную визуализацию, в исследовании кипения.
4. Экспериментально определить местную плотность теплового потока при кипении насыщенной воды на перегретой поверхности.
5. Комплексным методом выявить связь между режимами кипения и плотностью теплового потока, определенной методом градиентной теплотометрии.
6. Экспериментально определить влияние полидисперсной взвеси Al_2O_3 на теплообмен при кипении.
7. Исследовать влияние монодисперсных взвесей Al_2O_3 и TiO_2 на теплообмен при кипении.
8. Проанализировать полученные результаты, обсудить особенности и возможности градиентной теплотометрии.

Научная новизна диссертационной работы состоит:

– в инновационном применении градиентной теплотометрии в составе комплексной методики для изучения теплообмена при кипении в большом объеме на перегретых поверхностях;

- в получении данных о распределении местной плотности теплового потока при кипении на поверхности перегретой модели в большом объеме;
- в получении данных о длительности различных режимов кипения и значениях местной плотности теплового потока в этих режимах;
- в диагностике режимов кипения в оптически непрозрачных средах по данным градиентной теплотометрии;
- в получении данных о влиянии взвеси твердых микро- и наночастиц Al_2O_3 и TiO_2 на теплообмен при кипении на перегретых поверхностях.

Теоретическая и практическая значимость работы таковы.

- Реализована градиентная теплотометрия как метод измерения местной плотности теплового потока, сочетаемая с термометрией и высокоскоростной визуализацией кипения.
- Получены данные о распределении местной плотности теплового потока при кипении воды на поверхности шара при различных режимных параметрах.
- Доказана возможность идентифицировать режимы кипения в оптически непрозрачных жидкостях по данным градиентной теплотометрии.
- Доказаны применимость и информативность градиентной теплотометрии в исследовании теплообмена при кипении в оптически непрозрачных жидкостях и в условиях, не допускающих визуального контроля.

Методология и методы исследования включает градиентную теплотометрию, термометрию, высокоскоростную визуализацию, а также оценку неопределенности измерений плотности теплового потока.

Положения, выносимые на защиту:

1. Данные о местной плотности теплового потока при кипении чистой воды на перегретой поверхности, полученные градиентной теплотометрией.
2. Данные о местной плотности теплового потока при кипении чистой воды с добавлением частиц Al_2O_3 размерами от 54 нм до 1 мкм, полученные градиентной теплотометрией.
3. Данные о местной плотности теплового потока при кипении чистой воды с добавлением частиц TiO_2 размерами от 54 нм до 500 нм, полученные градиентной теплотометрией.
4. Использование градиентной теплотометрии как средства диагностики режимов кипения в оптически непрозрачных жидкостях.

Личный вклад соискателя. Автор принимал непосредственное участие в разработке и изготовлении установки, в отработке технологии производства ГГДТП из композиции медь + никель методом диффузионной сварки в среде аргона. Участвовал в разработке и конструировании экспериментального стенда, участвовал в создании экспериментальных моделей. Разработал способ крепления гетерогенного градиентного датчика теплового потока на модели. Вместе с соавторами получил результаты при кипении воды и взвесей Al_2O_3 и TiO_2 в большом объеме на перегретой поверхности. Проанализировал и обобщил полученные данные, принимал участие в подготовке статей, докладов и выступлений на семинарах и конференциях.

Достоверность полученных в работе результатов определяется:

- использованием метрологически аттестованных приборов;

- расчетом неопределенностей, характерных для выполненных измерений по действующим отечественным стандартам;
- качественным соответствием полученных результатов данным, приведенным в литературе.

Апробация работы проводилась на семинарах и конференциях:

- на III международной конференции «Современные проблемы теплофизики и энергетики», Москва, 19-23 октября 2020;
- 59-ая Международная научная студенческая конференция (МНСК-2021). Новосибирск, Россия, 2021.
- Современные проблемы теплофизики и энергетики. III международная конференция. Москва, 2020.
- 16ая Международная научно-техническая конференция «Оптические методы исследования потоков», ОМИП-2021. Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, 28 июня – 02 июля, 2021.
- XVI Всероссийская Школа-Конференция молодых ученых с международным участием «Актуальные Вопросы Теплофизики и Физической Гидрогазодинамики» (АВТФГ-2020). Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, 24-27 ноября 2020 г. Новосибирск.;
- на XXIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 24-28 мая 2021, Екатеринбург;
- на Всероссийской конференции «XXXVIII Сибирский теплофизический семинар», Новосибирск, 29 – 31 августа 2022;
- на восьмой Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-8, Москва, 17 – 22 октября 2022;
- Енисейская теплофизика — 2023. I Всероссийская научная конференция с международным участием, Сибирский Федеральный Университет, 28-31 марта, Красноярск, 2023.
- на XXIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А. И. Леонтьева, посвященной 100-летию академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках», 23 – 27 мая 2023, Казань.
- XVII Минский международный форум по тепломассообмену, 20 – 24 мая, 2024, Минск.

Основные результаты диссертации опубликованы изложены в 12 научных работах, в том числе в 3 публикациях в изданиях, индексируемых в международных базах данных, и 3 публикациях в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация включает введение, 4 главы основного текста, заключение и список литературы. Она состоит из 112 страниц основного текста, 74 рисунков и 3 таблиц. Список литературы включает 60 наименований. Значительная часть проведенных исследований выполнялась в рамках гранта РФ №22-29-00160.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, описана степень ее разработанности, сформулированы цели и задачи исследования, его научная новизна, теоретическая и практическая ценность, методология, а также положения, выносимые на защиту. Обоснована достоверность результатов; представлены сведения об апробации и публикациях по теме диссертационной работы.

В первой главе представлен обзор литературы, посвященной расчету и экспериментальному определению плотности теплового потока при кипении в большом объеме. Рассмотрены существующие методики расчета первой критической плотности теплового потока. Описаны и проанализированы основные экспериментальные способы определения плотности теплового потока при кипении.

Рассмотрены существующие способы интенсификации теплообмена при кипении и описаны результаты, полученные при кипении взвесей твердых частиц.

Обзор показал, что при всем многообразии экспериментальных работ и реализуемых в них методик оптимальный метод исследования теплообмена при кипении не определен.

Во второй главе описаны методика, техника и метрология эксперимента.

Основным методом исследования является градиентная теплотометрия – метод, основанный на использовании гетерогенных градиентных датчиков теплового потока (ГГДТП). Принцип действия таких датчиков основан на поперечном эффекте Зеебека. Анизотропия термоэлектрических свойств позволяет фиксировать плотность теплового потока, проходящего через этот материал. Датчики такого типа чаще всего создаются из материалов с природной анизотропией теплофизических термоэлектрических свойств (сурьмы, оксида магния, висмута). Неустранимым недостатком датчиков из монокристаллического висмута является низкая температура плавления (544 К). По аналогии с материалами, обладающими природной анизотропией свойств, созданы гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП), датчики с искусственной анизотропией термоэлектрических свойств. Датчики такого типа представляют собой многослойную композицию из разнородных материалов, соединенных диффузионной сваркой. Принцип их работы близок к датчикам с естественной анизотропией.

В работе применены ГГДТП из композиции медь-никель (рисунок 1 а).

$$E_0 = S_0 \cdot A \cdot q, \text{ мВ}, \quad (1)$$

где E_0 – термоЭДС, мВ; S_0 – вольт-ваттная чувствительность ГДТП, мВ/Вт; A – площадь ГГДТП в плане, м^2 ; q – плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Выбрана пара медь-никель (рисунок 1, б), которая обладает разностью коэффициентов Зеебека 24 мкВ/К. В условиях эксперимента максимальная температура кратковременно составляет 464 °С, что не повреждает ГГДТП и не меняет его чувствительность. Отградуированный и подготовленный ГГДТП устанавливался на экспериментальную модель (рисунок 2).

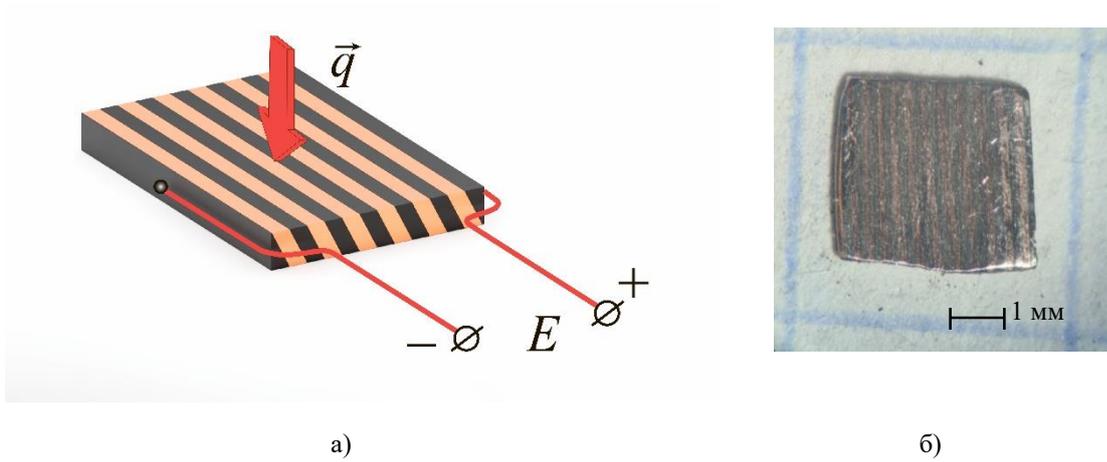


Рисунок 1 – ГГДТП: а – модель, б – фото

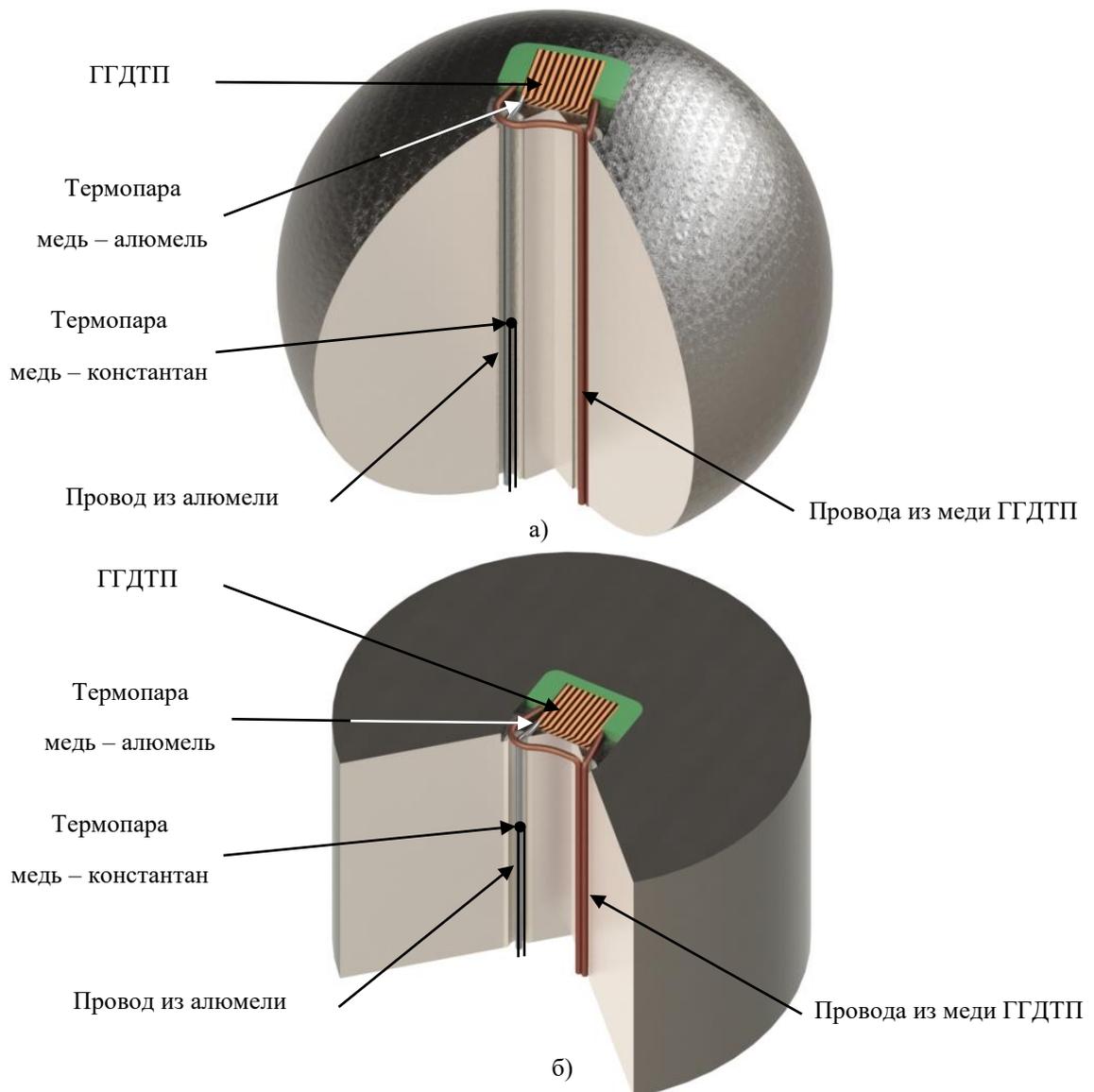


Рисунок 2 – Экспериментальные модели: а – шар, б – цилиндр

В качестве моделей использованы: шар диаметром 34 мм и цилиндр диаметром 34 мм и высотой 22,8 мм, выполненные из титана ВТ 22. Высота цилиндра подбиралась так, чтобы сохранить идентичность полных теплоемкостей моделей. Материал выбран по результатам пилотных опытов. Поверхность моделей из латуни или меди после 2 - 3 экспериментов покрывалась рытвинами и слоем окислов, что не позволяет применять эти материалы при многократных экспериментах. Титан ВТ 22 не изменяет состояние поверхности на протяжении всех опытов, его низкая теплопроводность ($\lambda = 9 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$) обеспечивает достаточное для проведения опытов время охлаждения.

Модели с установленными ГГДТП и термопарами помещали на экспериментальную установку (рисунок 3).

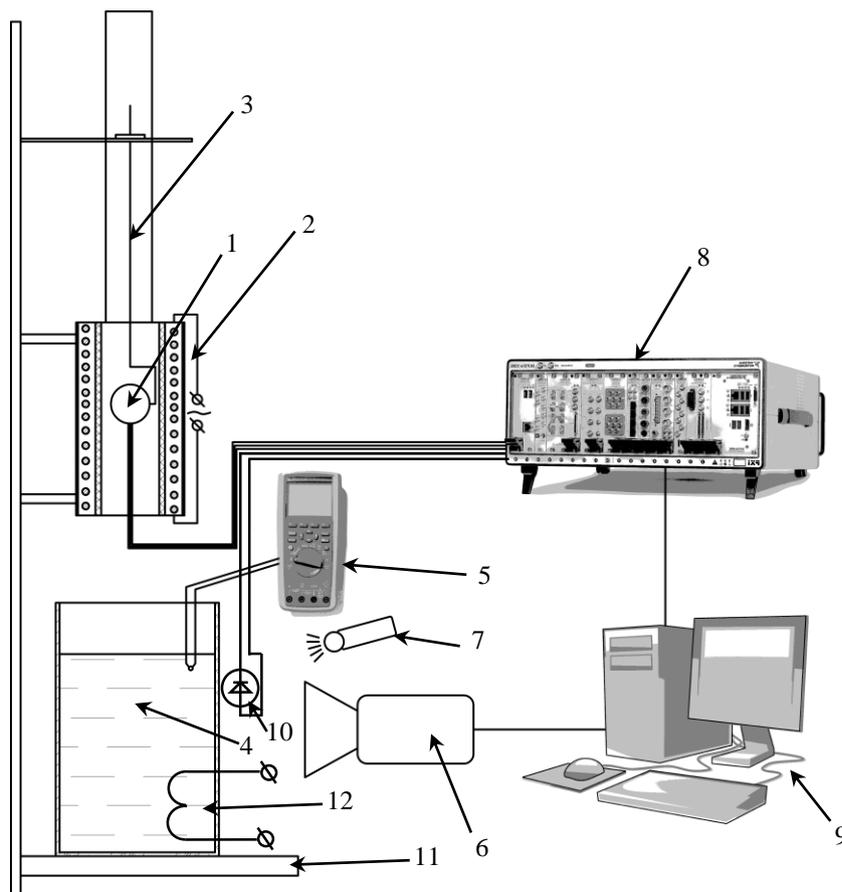


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки: 1 – модель, 2 – печь, 3 – подвижная державка, 4 – сосуд с жидкостью, 5 – прибор Fluke 289 с термопарой, 6 – высокоскоростная камера Evercam 1000-4-M, 7 – источник света ;8 – АЦП NIPXI-1050, 9 – компьютер, 10 – светодиод, 11 – несущая рама, 12 – нагреватель

Экспериментальная установка смонтирована на несущей раме 11. На ней установлена проходная электрическая печь 2 максимальной мощностью 1 кВт для нагрева модели 1. Запись сигналов с термопар и ГГДТП велась на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фирмы National Instruments 8. Сосуд с исследуемой жидкостью 4 устанавливался под проходной печью. Перемещение модели 1 осуществлялось подвижной державкой 3.

Перед опытом модели фиксировались державкой 3 в центре печи 2. Равномерность прогрева оценивалась по показаниям термопар, установленных на поверхности и в центре моделей.

Для синхронизации записи сигнала с первичных преобразователей и высокоскоростной съемки в схему установки введены светодиод 10, высокоскоростная камера 6 и прожектор 7 (камера Evercam 1000-4-M обладает низкой светочувствительностью, и при обычном освещении вести съемку невозможно). В область съемки помещен светодиод 10, подключенный к одному из каналов АЦП. При попадании на него света фиксировалась временная отметка на шкалах сигналов ГГДТП и термопар. Камера записывала необходимый временной промежуток и отгружала серию фотографий в компьютер.

В качестве примера приведены результаты, полученные при кипении недогретой воды ($T_f = 64 \text{ }^\circ\text{C}$) на поверхности шара с начальной температурой $T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$. Временная теплограмма и термограмма представлены на рисунке 4.

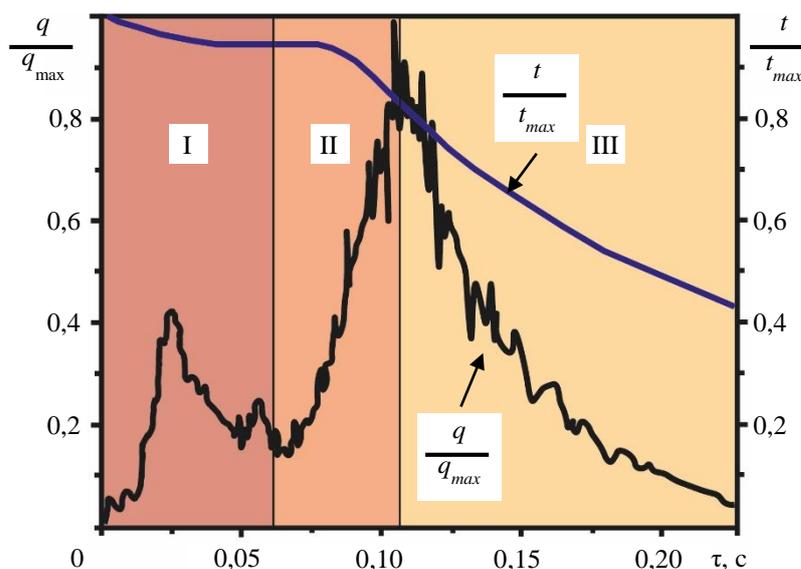


Рисунок 4 – Временная тепло и термограммы при $T_w = 464 \text{ }^\circ\text{C}$ $T_f = 64 \text{ }^\circ\text{C}$

Кадры во временном диапазоне I демонстрируют пленочный режим кипения (рисунок 5, а). Вся поверхность модели покрыта пленкой, лишь на месте размещения высокоглиноземистого мертеля, использованного для фиксации ГГДТП, она отсутствует, однако поверхность ГГДТП покрыта пленкой так же, как остальная поверхность модели. Характер снижения температуры поверхности также указывает на пленочный режим кипения. На временном промежутке II плотность теплового потока возрастает. Высокоскоростная визуализация демонстрирует участки поверхности, на которых произошло разрушение пленки (рисунок 5, б). В этом промежутке происходит движение сухих пятен, которые приводят и к зарождению пленки, и к ее разрушению. Многократные эксперименты продемонстрировали, что место разрушения пленки никак не связано с установленным датчиком, наличием державки или способом вывода проводов. Третий (III) временной отрезок соответствует переходу к пузырьковому кипению. Термометрия фиксирует максимальное значение плотности теплового потока в момент разрушения пленки. Термометрия фиксирует резкое ускорение снижения температуры. Высокоскоростная визуализация демонстрирует полное отсутствие пленки на поверхности модели и наличие одиночных пузырей (рисунок 5, в).

Комплексная методика позволила однозначно интерпретировать показания ГГДТП в данной постановке эксперимента. Этот вывод позволил в дальнейшем рассматривать сходные процессы в оптически непрозрачных жидкостях и делать выводы о режимах кипения – другими словами, вести диагностику режимов кипения по данным градиентной теплометрии.

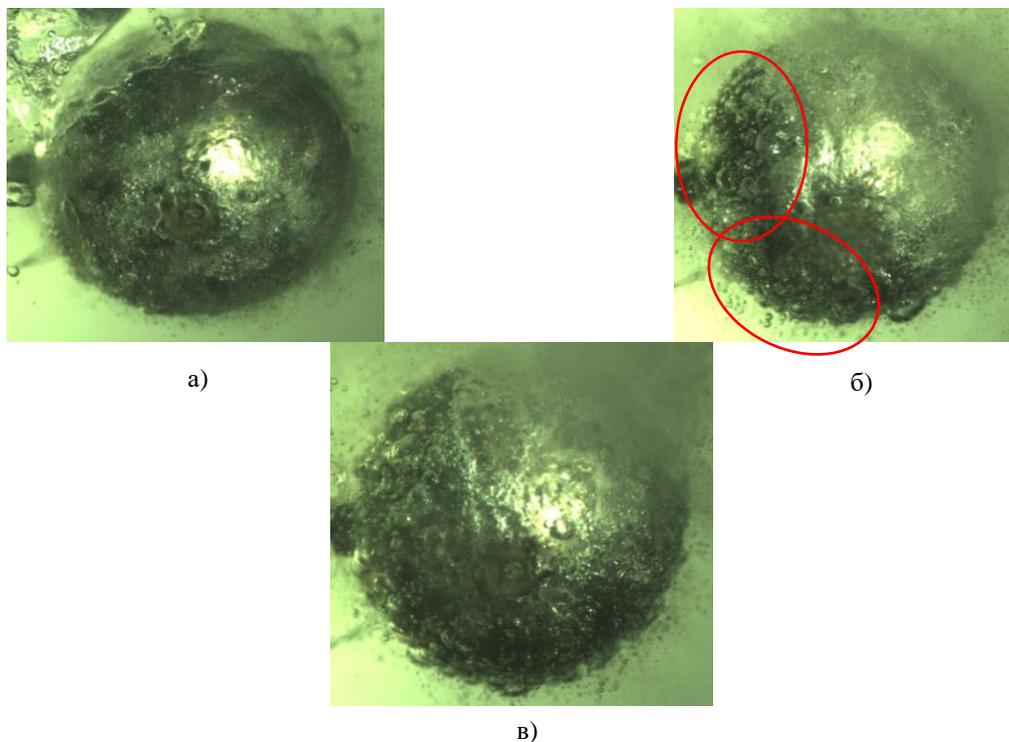


Рисунок 5 – Фото модели в процессе остывания: а – пленочный режим, б – переходный режим, в – пузырьковый режим

Во второй главе подробно описано измерительное оборудование и рассчитана неопределённость измерений. Относительная суммарная неопределенность измерения плотности теплового потока составила 7,4 %.

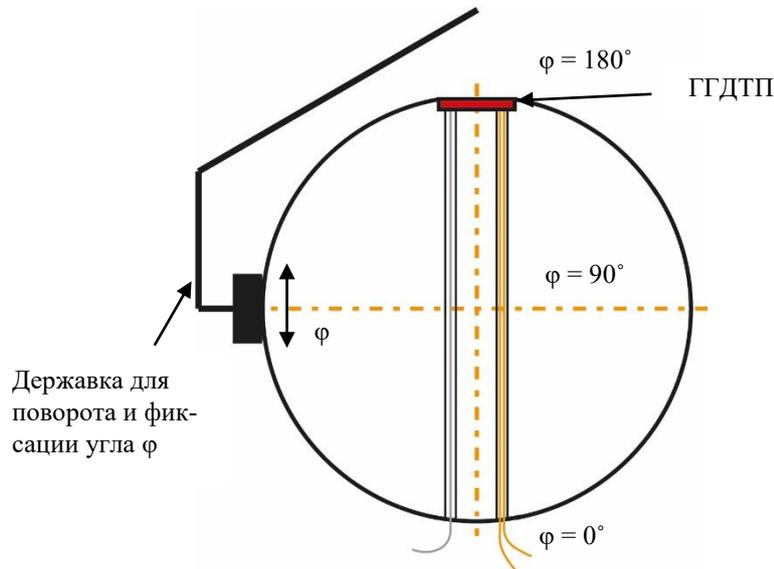
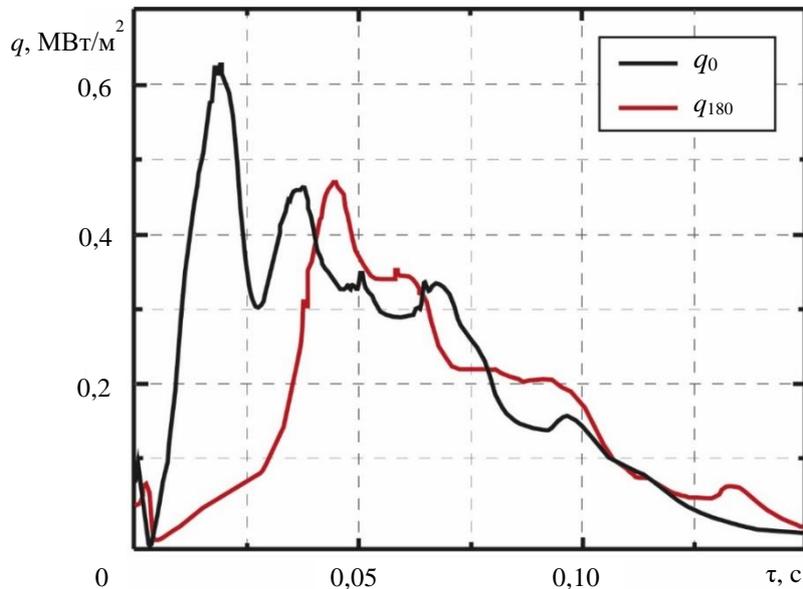
В третьей главе описаны результаты экспериментального исследования кипения воды в большом объеме с различными недогревами.

Эксперименты в этой главе разделены на 3 группы:

- кипение насыщенной воды на перегретой модели,
- кипение воды с недогревом до температуры насыщения свыше 50 °С,
- Кипение воды с недогревом до температуры насыщения ниже 50 °С.

На первом этапе экспериментов в качестве модели выбран шар из титана ВТ 22 диаметром 34 мм, что исключает вклад концевых эффектов. Проворот модели относительно горизонтальной оси меняет положение ГГДТП относительно вертикальной оси на угол φ между нормалью к поверхности ГГДТП и вертикальной осью модели (рисунок 6).

Исследовано кипение воды $T_f = 98$ °С (при атмосферном давлении) на поверхности шара с начальной температурой $T_w = 300$ °С. В качестве примера рассмотрим два крайних положения ГГДТП: $\varphi = 0^\circ$ и 180° (рисунок 7).

Рисунок 6 – Схема проворота модели с указанием угла φ Рисунок 7 – Временная теплограмма остывания шара в воде ($T_f = 98^\circ\text{C}$)

В начальный момент времени ГГДТП фиксирует значения плотности теплового потока при пленочном кипении, которые близки между собой для любого угла φ . Ввиду того, что скорость погружения шара под воду конечна, время нахождения отдельных частей поверхности модели под водой различно; это влияет на длительность переходного режима. При $\varphi = 0^\circ$ переходный режим протекает быстрее, чем для $\varphi = 180^\circ$.

В пилотных опытах получены значения плотности теплового потока при разрушении пленки и переходе к пузырьковому режиму. При $\varphi = 0^\circ$ максимальная плотность теплового потока составила $0,63 \text{ МВт/м}^2$, а при $\varphi = 180^\circ$ $0,47 \text{ МВт/м}^2$, что согласуется с общепризнанной теорией. Пульсации плотности теплового потока в области пузырькового кипения связаны с образованием и отрывом отдельных пузырей. По мере остывания модели амплитуда колебаний снижается.

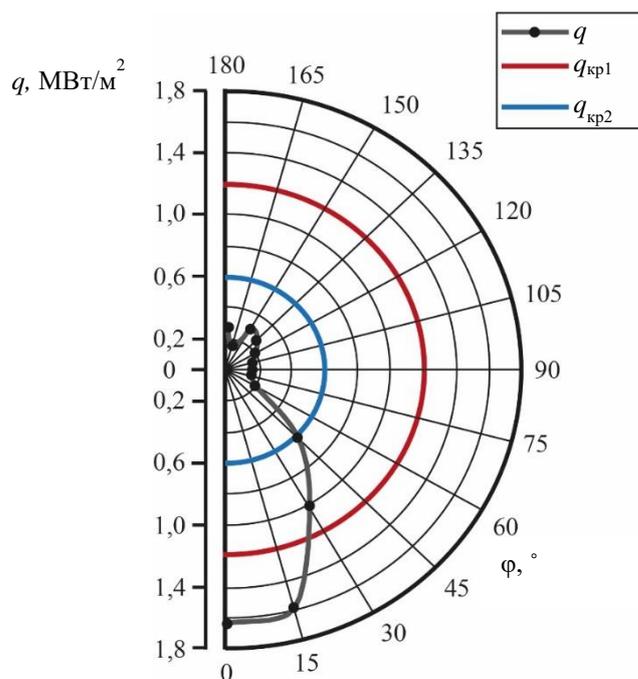


Рисунок 8 – Круговая теплограмма ($T_w = 350 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

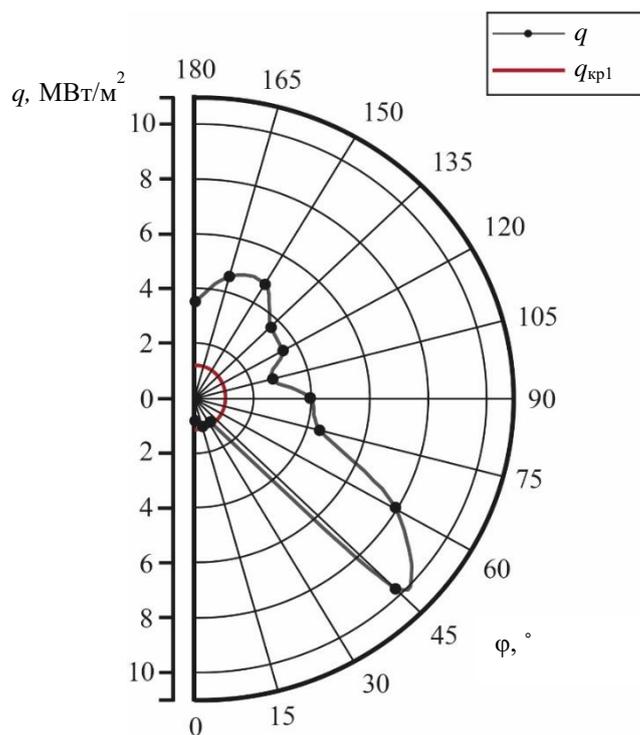


Рисунок 9 – Круговая теплограмма ($T_w = 450 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_f = 25 \text{ }^\circ\text{C}$)

Эксперименты с недогревами воды больше $50 \text{ }^\circ\text{C}$ выявили режимы, при которых устойчивого пленочного кипения на поверхности всей модели не наблюдается. Это приводит к высокой неравномерности плотности теплового потока по поверхности модели.

Эти результаты получены при погружении шара с начальной температурой $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ в воду с температурой $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение плотности теплового потока по поверхности шара представлены на рисунке 8.

При этих условиях пленочного кипения на поверхности шара не зафиксировано. Максимальная плотность теплового потока приходится на южный полюсе (0°). Эта точка первой касается поверхности воды, на ней возникает наибольшая разность температур, и, как следствие, плотность теплового потока максимальна. В процессе погружения шар остывает, что снижает плотность теплового потока в 5 раз, при $\varphi = 0^{\circ}$.

Следующим шагом стало увеличение начальной температуры модели до $T_w = 450\text{ }^{\circ}\text{C}$. Распределение плотности теплового потока по поверхности шара представлено на рисунке 9.

В момент контакта шара с поверхностью воды на южном полюсе возникает паровая подушка, которая препятствует контакту жидкости с поверхностью модели. Поверхность покрыта большим количеством микропузырей. ГГДТП в этот момент фиксирует низкую плотность теплового потока, от $0,9$ до $1,3\text{ МВт/м}^2$. Эти значения поддерживаются до $\varphi = 30^{\circ}$. Дальнейшее погружение приводит к формированию крупных пузырей и росту плотности теплового потока, при $\varphi = 45^{\circ}$ $q = 9,7\text{ МВт/м}^2$. При полном погружении шара характер теплообмена не меняется, сохраняется картина пузырькового кипения

Увеличение температуры воды привело к значительному изменению круговых диаграмм. В эксперименте с начальной температурой шара $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температурой воды $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рисунок 10) пик плотности теплового потока размыт.

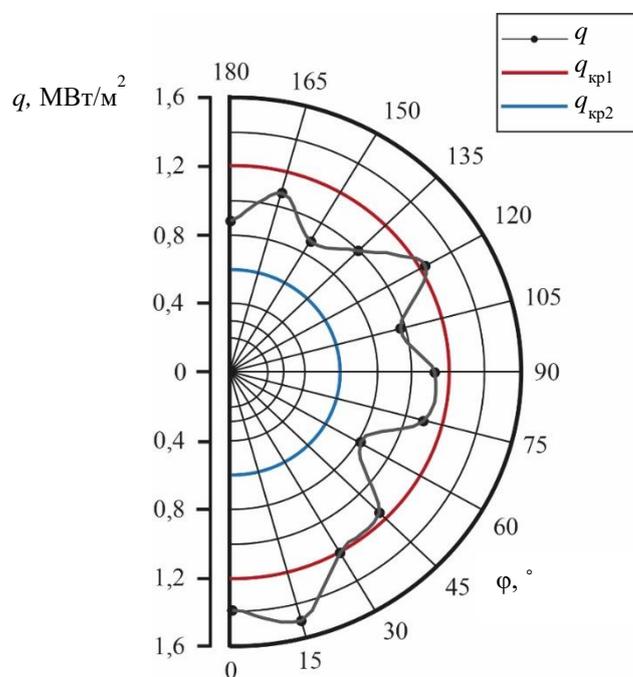


Рисунок 10 – Круговая теплограмма ($T_w = 350\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_f = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Увеличение начальной температуры модели до $T_w = 450$ °С при температуре воды $T_f = 50$ °С привело к искажению профиля плотности теплового потока и сдвигу его максимума к углу $\varphi = 80$ ° (рисунок 11)

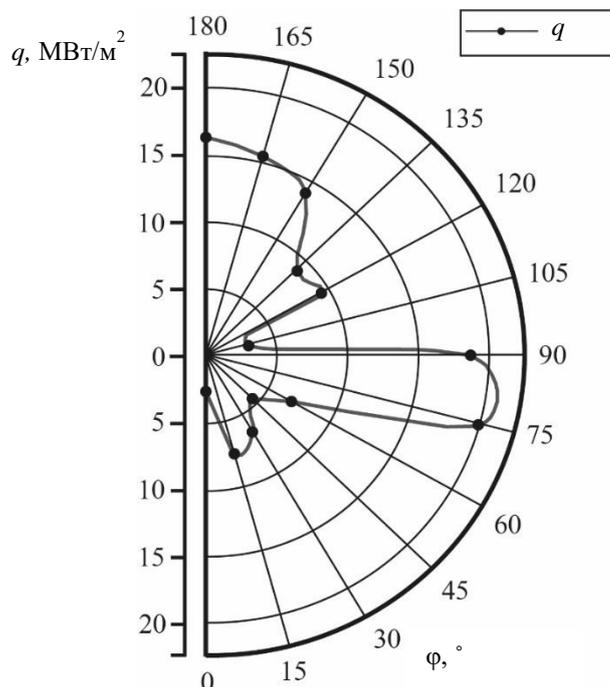


Рисунок 11 – Круговая теплограмма ($T_w = 450$ °С, $T_f = 50$ °С)

В момент контакта модели с поверхностью воды возникает паровая подушка. При погружении модели на половину объема паровая подушка разрушается, что приводит к резкому росту плотности теплового потока.

Для сопоставления режимов по общему теплосъёму плотность теплового потока была осреднена по поверхности шара. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Осредненные значения плотности теплового потока при кипении недогретой воды

| Режим | Начальный Температурный напор, $\Delta T = T_w - T_f$, К | Средняя плотность теплового потока, q , МВт/м ² |
|-------------------------------|---|--|
| $T_w = 450$ °С, $T_f = 50$ °С | 400 | 9,33 |
| $T_w = 450$ °С, $T_f = 25$ °С | 425 | 3,93 |
| $T_w = 350$ °С, $T_f = 50$ °С | 300 | 0,93 |
| $T_w = 350$ °С, $T_f = 25$ °С | 325 | 0,24 |

Видно, что недогрев воды влияет на уровень теплосъёма сильнее, чем начальный температурный напор. Зафиксировано существование различных режимов кипения на одной поверхности. Получено влияние недогрева на плотность теплового потока и режимы кипения. Результаты раздела говорят о применимости данной методики при изучении кипения на поверхностях с различными режимами кипения, включая неизотермические поверхности (например, оребрение).

Увеличение температуры воды выше $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ позволило зафиксировать пленочный режим по всей поверхности модели, что в свою очередь, позволяет оценить влияние исходных параметров T_w и T_f на плотность теплового потока в момент разрушения пленки и перехода к пузырьковому режиму. В этих опытах установлено, что максимальная температура модели, которая обеспечивает надежность и длительное время работы ГДТП и термопар, составила $T_w = 464\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальный недогрев воды, при котором наблюдается пленочный режим кипения по всей поверхности модели, $T_f = 36\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Опыты показали, что наименее интенсивное кипение происходит на северном полюсе модели, при $\varphi = 180\text{ }^{\circ}$. Если здесь происходит пленочное кипение, то пленкой покрыта вся модель. Такое положение ГДТП на модели приблизительно соответствует кипению на поверхности горизонтальной пластины, результаты сопоставимы с данными других авторов.

В качестве примера приведен режим с максимальным недогревом воды ($T_w = 464\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_f = 64\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рисунок 12). Интересна область пленочного кипения (I), а также значения плотности теплового потока q_* и температуры поверхности T_* при переходе в пузырьковый режим кипения, которые отмечены на рисунке 12 красным кругом.

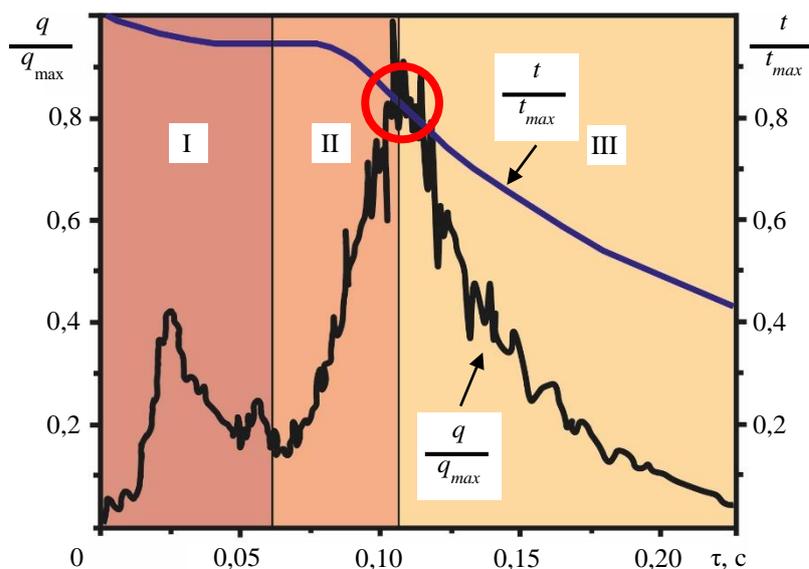


Рисунок 12 – Временная тепло и термограмма ($T_w = 464\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_f = 64$)

В этой серии опытов получена местная плотность теплового потока в начале пузырькового кипения при остывании модели. Зависимость плотности теплового потока от недогрева жидкости представлена на рисунке 13.

При увеличении недогрева наблюдается рост плотности теплового потока в начале пузырькового режима кипения; зафиксирован рост температуры на поверхности модели, что соотносится с общепринятыми представлениями. Полученные данные можно представить в виде зависимости

$$q_* \approx q_{0*} + \alpha \cdot \Delta T, \text{ Вт/м}^2, \quad (2)$$

где q_* – плотность теплового потока в начале пузырькового режима кипения в недогретой жидкости, Вт/м², q_{0*} – плотность теплового потока в начале пузырькового режима кипения в насыщенной жидкости, Вт/м², α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), ΔT – недогрев жидкости до температуры насыщения, К.

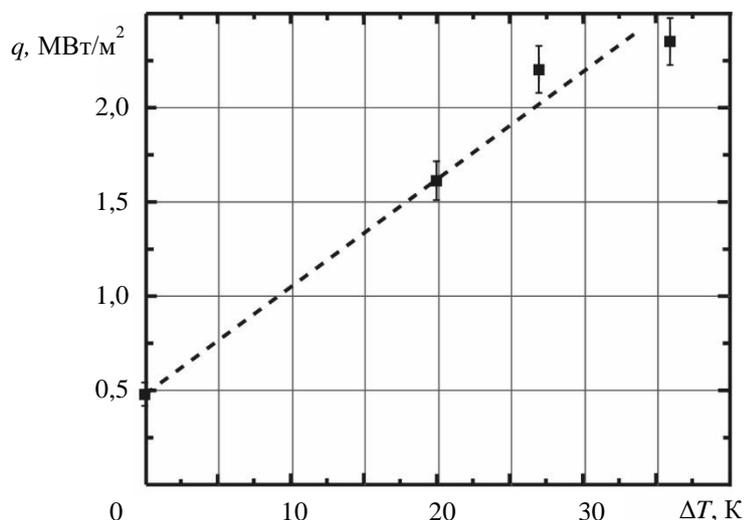


Рисунок 13 – Зависимость плотности теплового потока при начале пузырькового режима кипения от недогрева воды

Сходные значения плотности теплового потока получены и на цилиндрической модели. Эксперименты продемонстрировали, что различие в площади моделей (площадь поверхности шара составила 3629 мм², а цилиндра 4249 мм²) не сказалось на местную плотность теплового потока в начале пузырькового режима и незначительно повлияло на среднее значение плотности теплового потока при пленочном кипении.

Опыты с цилиндром при тех же режимах демонстрируют, что влияние формы модели, наличие концевых эффектов и искажения поля температуры не влияет на значения местной плотности теплового потока при начале пузырькового кипения. Определяющим фактором является недогрев жидкости.

В четвертой главе представлены результаты экспериментов при кипении взвесей твердых частиц Al_2O_3 и TiO_2 в воде. Начальная температура модели $T_w = 464$ °С, температура взвеси T_f изменялась от 90 до 64 °С. Градиентная теплометрия позволила рассмотреть влияние этих жидкостей на длительность и интенсивность режимов кипения и дать рекомендации о целесообразности дальнейшего изучения и стабилизации взвесей. Значения плотности теплового потока при каждом из режимов и их длительность играют важную роль. При рассмотрении различных способов интенсификации, ввиду сложности и многофакторности кипения, они могут влиять не только на величину отводимой плотности теплового потока, но и на длительность отдельно режима, что отследить другим методом исследования затруднительно.

Использование частиц Al_2O_3 с максимальным размером 1 мкм продемонстрировало положительный эффект. Временные теплограммы для кипения чистой воды и воды с добавлением микрочастиц Al_2O_3 представлены на рисунке 14.

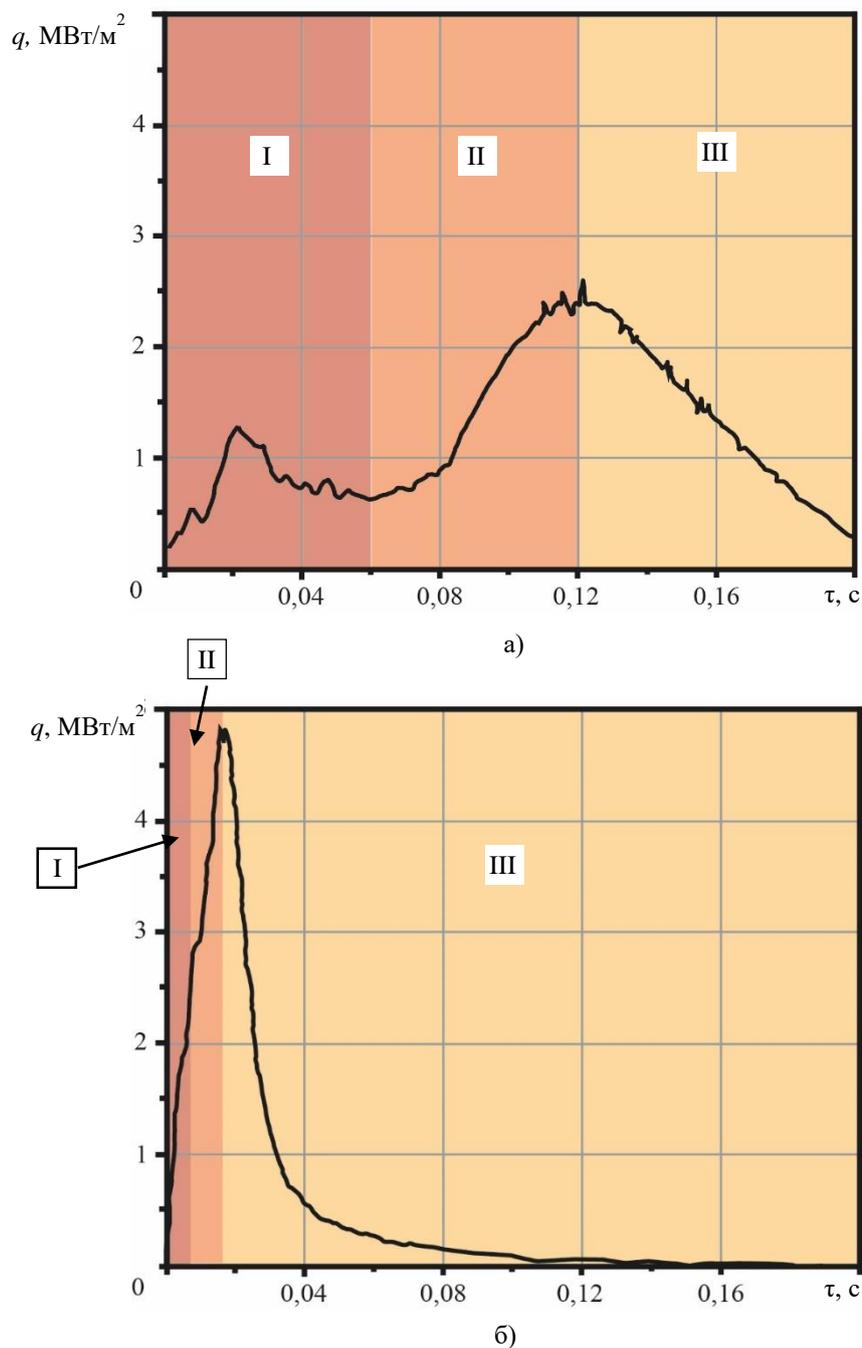


Рисунок 14 – Временные теплограммы при кипении воды (а) и взвеси частиц Al_2O_3 $\omega = 0,32\%$ (б)

Для примера рассмотрим режим кипения воды и взвеси микрочастиц Al_2O_3 (массовая концентрация $\omega = 0,32\%$) с начальной температурой $64\text{ }^\circ\text{C}$ при начальной температуре шара $464\text{ }^\circ\text{C}$. Введем обозначения, для режимов кипения:

- I – пленочный режим кипения в воде и взвеси
- II – переходный режим кипения в воде и взвеси

- III – пузырьковый режим кипения и свободная конвекция в воде и взвеси.

При добавлении микрочастиц сокращается длительность пленочного и переходных режимов, что повышает местную плотность теплового потока при переходе к пузырьковому режиму. Установившегося пленочного режима не наблюдалось. Интенсивность отвода теплоты выросла, что не позволило сформироваться устойчивому пленочному кипению. Значительно сокращается время остывания модели. Рисунок 15 демонстрирует различие в поведении временных теплограмм в зависимости от массовой концентрации частиц Al_2O_3 .

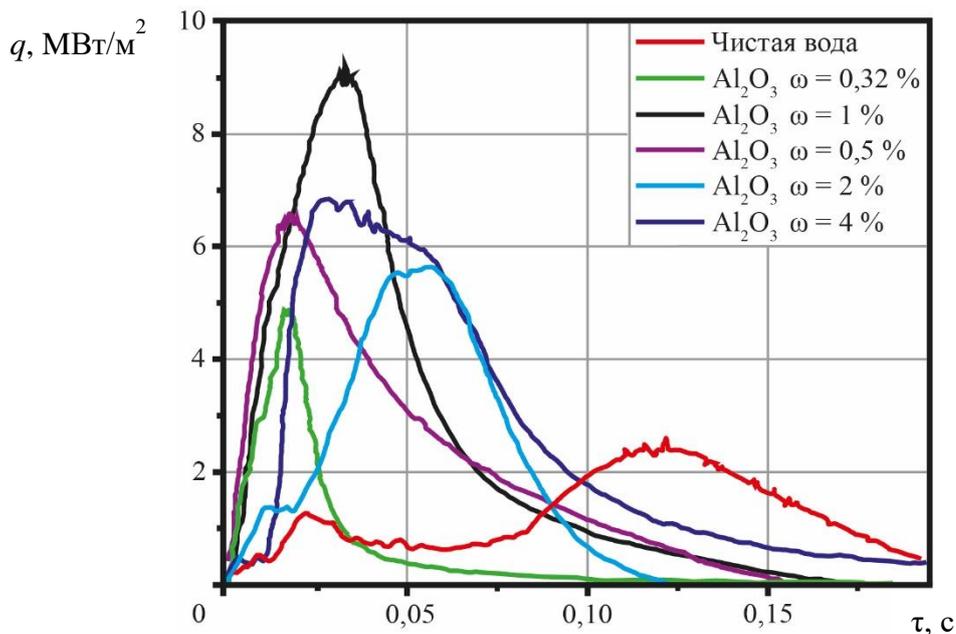


Рисунок 15 – Временные теплограммы при кипении воды и взвеси частиц Al_2O_3 , при различных массовых концентрациях частиц

На рисунке 16 приведены значения максимальной плотности теплового потока при переходе к пузырьковому режиму кипения. При увеличении температуры жидкости максимальная плотность теплового потока снижается, но по сравнению с чистой водой, той же температуры, становится выше.

При проведении экспериментов замечено осаждение частиц на модели. Устойчивой адгезии получить не удалось, при извлечении модели из сосуда весь осажденный слой разрушался. Модель перед каждым опытом отмывалась от остатков взвеси, чтобы исключить накопление загрязнений и формирование дополнительного поверхностного слоя. Эксперименты на шаре и цилиндре, различий в значениях максимальной плотности теплового потока не выявили.

Опыты с полидисперсной взвесью показали, что использование частиц Al_2O_3 с максимальным размером 1 мкм как интенсификатора дает положительный эффект при рассмотренных режимах, но какая фракция оказывает наибольшее влияние, не известно.

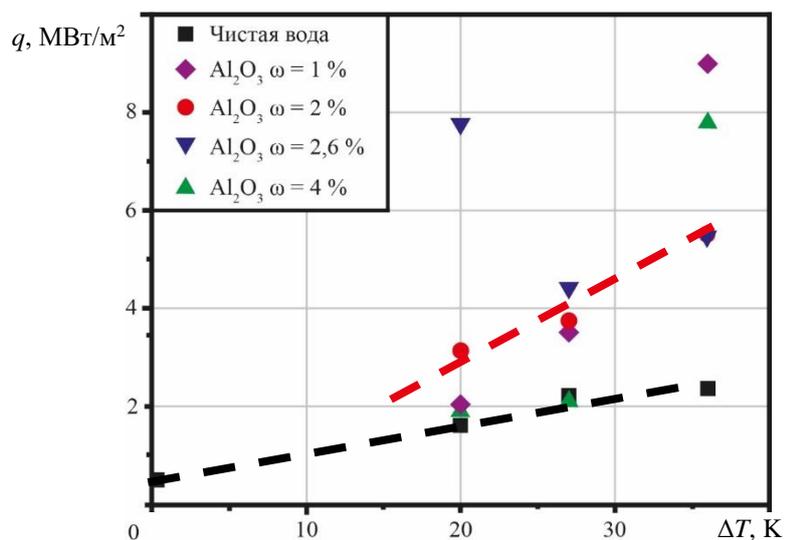


Рисунок 16 – Максимальная плотность теплового потока от недогрева жидкости при различных концентрациях частиц Al_2O_3 (1 мкм)

Монодисперсные частицы Al_2O_3 с размером частиц 54 нм продемонстрировали противоположный эффект. Временные теплограммы кипения воды и взвеси наночастиц Al_2O_3 (массовая концентрация $\omega = 0,32\%$) с начальной температурой $64\text{ }^\circ C$ при начальной температуре цилиндра $464\text{ }^\circ C$ представлены на рисунке 17 и 18.

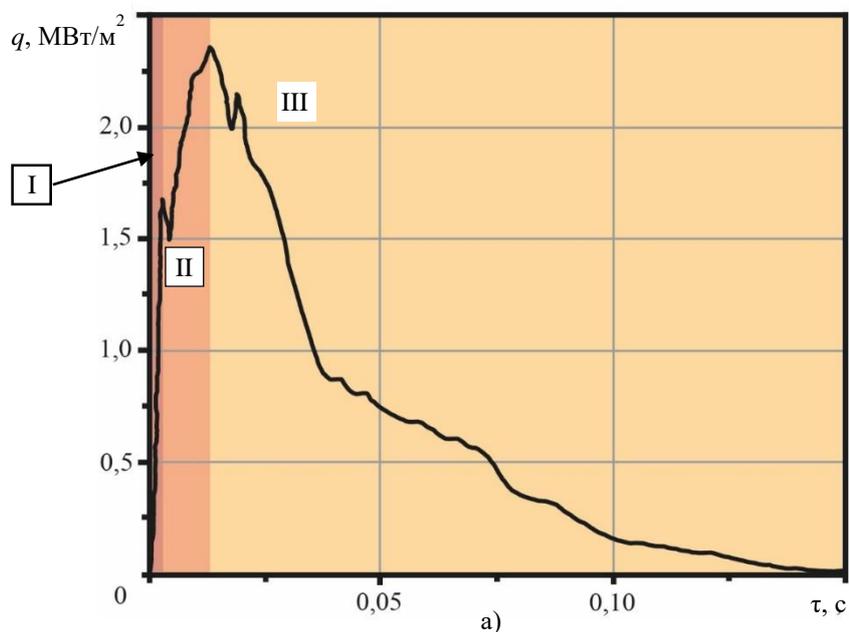


Рисунок 17 – Временная теплограмма при кипении воды на перегретой поверхности цилиндра

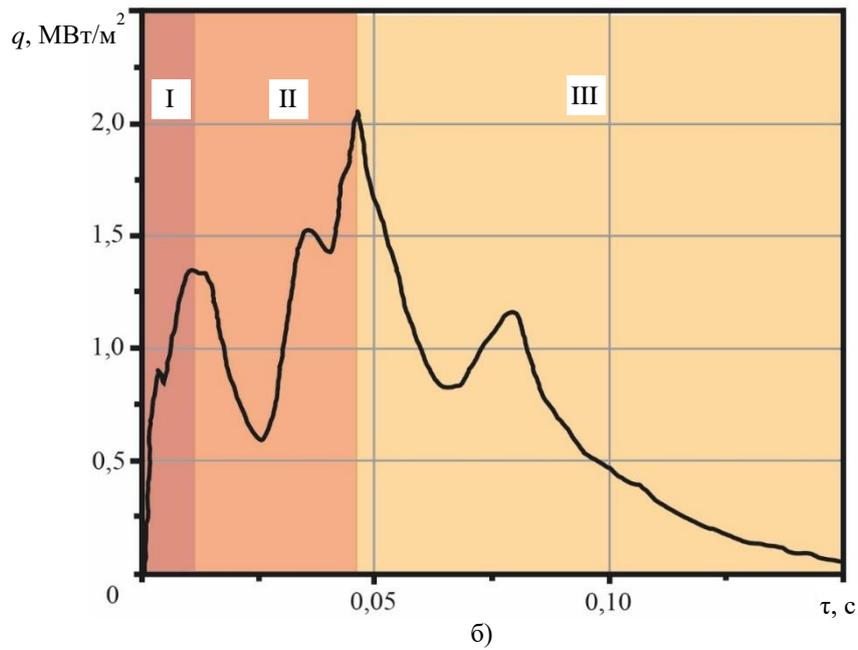


Рисунок 18 – Временная теплограмма при кипении взвеси наночастиц Al_2O_3 с $\omega = 0,32\%$ на перегретой поверхности цилиндра

Негативный эффект от добавления частиц сохраняется при всех рассмотренных температурных режимах в широком диапазоне концентраций. Все значения максимальной плотности теплового потока, полученные в экспериментах со взвесью Al_2O_3 , лежат на графике ниже, чем результаты, полученные при кипении воды (рисунок 19).

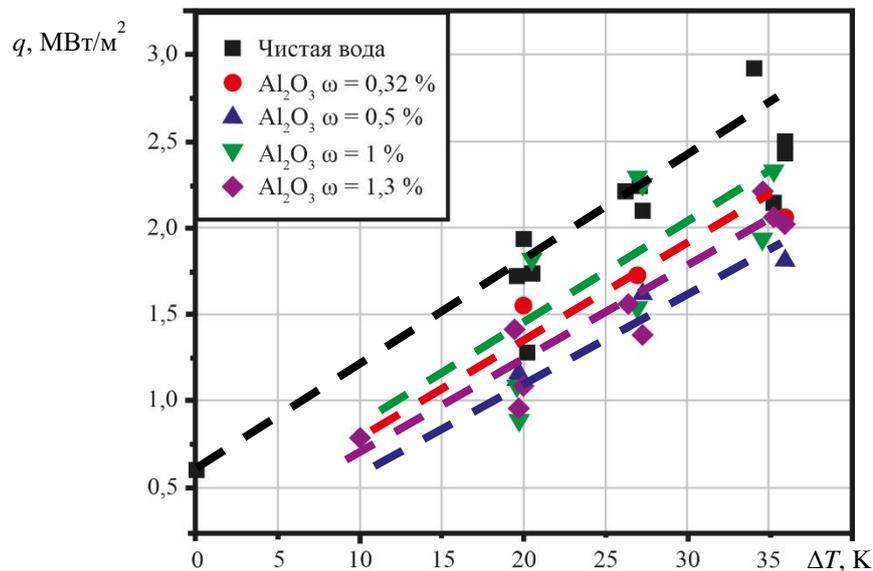


Рисунок 19 – Зависимость максимальной плотности теплового потока от недогрева взвеси и концентрации частиц Al_2O_3 (54 нм)

Аналогичные результаты продемонстрировала моодисперсная взвесь Al_2O_3 с размером частиц 200 нм (рисунок 20).

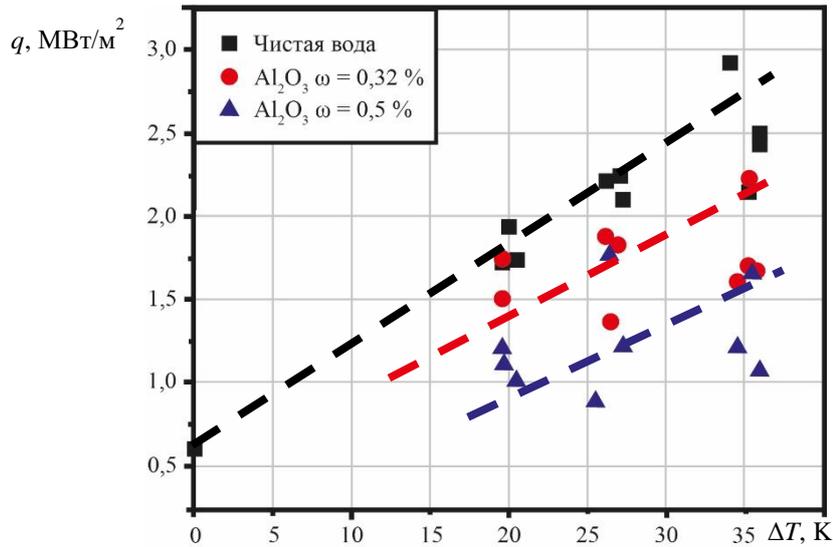


Рисунок 20 – Зависимость максимальной плотности теплового потока от недогрева взвеси и концентрации частиц Al_2O_3 (200 нм)

На рисунке 18 отражено снижение максимальной плотности теплового потока при увеличении концентрации до $\omega = 0,5\%$ при всех температурных режимах, что говорит о нецелесообразности дальнейшего изучения этой взвеси.

Дальнейшее увеличение размера частиц Al_2O_3 до 500 нм, положительных результатов не дало (рисунок 21).

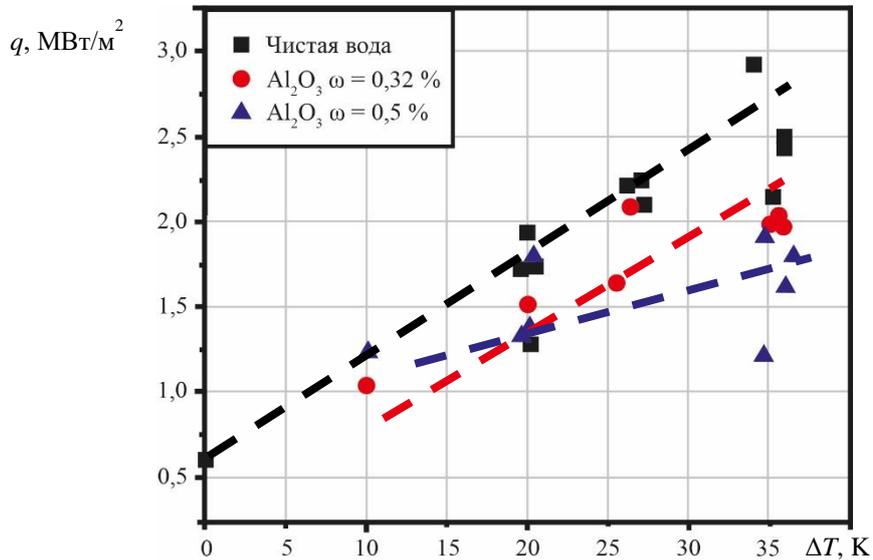


Рисунок 21 – Зависимость максимальной плотности теплового потока от недогрева взвеси и концентрации частиц Al_2O_3 (500 нм)

Частицы Al_2O_3 с размером 500 нм не оказывают заметного влияния на теплообмен в опытах с малыми недогревами; при увеличении недогрева добавка частиц снижает максимальную плотность теплового потока.

Рассмотрение моодисперсных взвесей демонстрирует сходство картин кипения вне зависимости от размера частиц. Положительного эффекта при добавлении Al_2O_3 к базовой жидкости, который обнаружен при использовании полидисперсных частиц Al_2O_3 , не выявлено.

Помимо взвеси частиц Al_2O_3 в качестве интенсификаторов используют частицы TiO_2 . Обобщение экспериментов с частицами TiO_2 (54 нм) (рисунок 22) демонстрирует картину, близкую к полученной при кипении взвеси частиц Al_2O_3 с тем же размером.

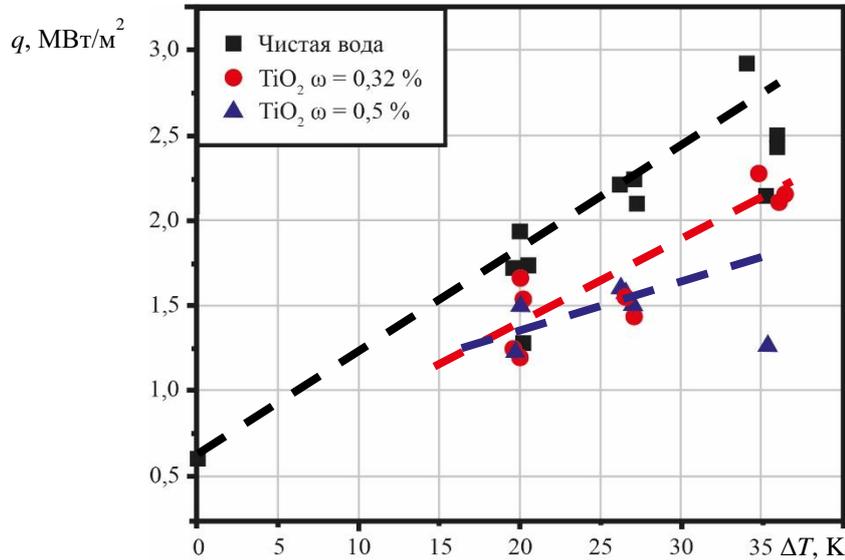


Рисунок 22 – Зависимость максимальной плотности теплового потока от недогрева взвеси и концентрации частиц TiO_2 (54 нм)

Частицы TiO_2 ухудшают теплообмен менее значимо, чем частицы Al_2O_3 того же размера.

Увеличение размера частиц TiO_2 до 200 нм привело к повышению максимальной плотности теплового потока. Концентрация взвеси $\omega = 0,32\%$ демонстрирует результаты, сопоставимые со значениями для чистой воды (рисунок 23).

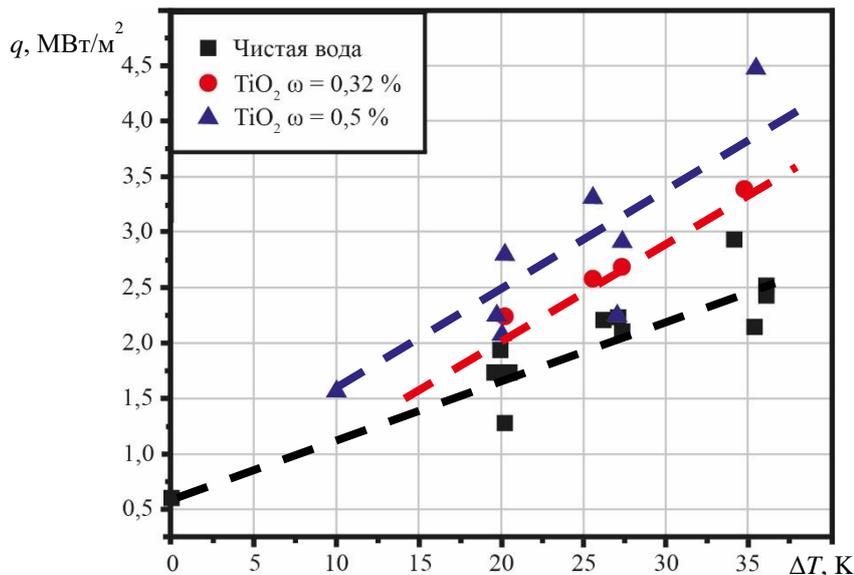


Рисунок 23 – Зависимость максимальной плотности теплового потока от недогрева взвеси и концентрации частиц TiO_2 (200 нм)

При увеличении концентрации до $\omega = 0,5 \%$ максимальная плотность теплового потока заметно вырастает, тогда как взвесь Al_2O_3 на сходных режимах, демонстрируют противоположный эффект.

Частицы TiO_2 с размером 500 нм не внесли заметных отличий от предыдущей серии опытов (рисунок 24).

Интенсификация проявляется слабее, но ухудшения теплообмена, как это было с монодисперсными частицами Al_2O_3 , не выявлено.

Уровня интенсификации, полученного на полидисперсной взвеси микрочастиц Al_2O_3 , достичь не удалось.

Полидисперсная взвесь частиц Al_2O_3 позволяет интенсифицировать теплообмен при кипении недогретой жидкости на перегретой поверхности. Эксперименты показали, что для каждого температурного режима, рассмотренного в работе, существует оптимальная концентрация частиц, при достижении которой наблюдается максимальный эффект. При увеличении температуры базовой жидкости оптимальная концентрация частиц увеличивается.

Принято считать, что при погружении модели в жидкость твердые частицы оседают на поверхности и формирует развитую поверхность теплообмена, что и является причиной интенсификации, однако при увеличении концентрации частиц зафиксировано снижение максимальной плотности теплового потока и увеличение длительности остывания. Превышение оптимальной концентрации приводит к переизбытку частиц вблизи поверхности нагрева и формируется теплоизоляционный слой. Добавление полидисперсных частиц Al_2O_3 к базовой жидкости обеспечивает интенсификацию на всем диапазоне рассмотренных режимов и концентраций.

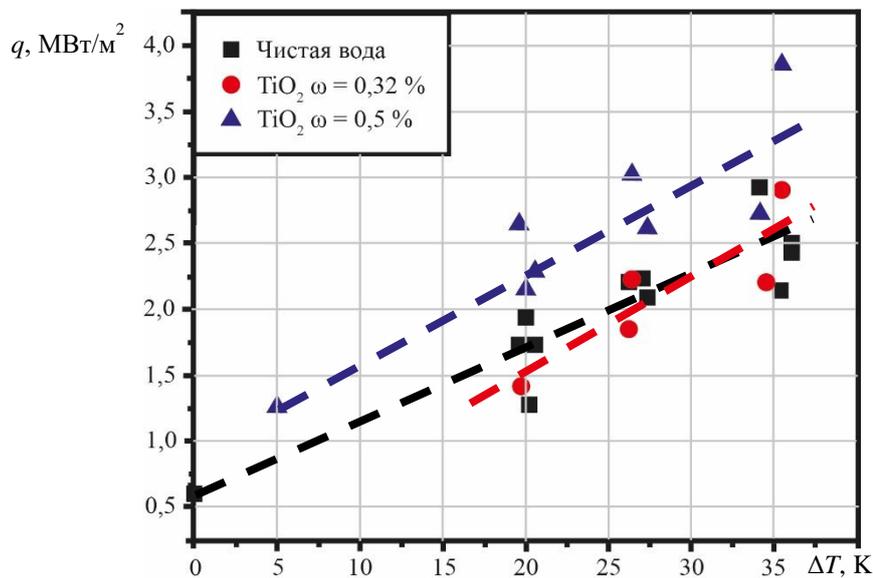


Рисунок 24 – Зависимость максимальной плотности теплового потока от недогрева взвеси и концентрации частиц TiO_2 (500 нм)

Положительный эффект, который получен при рассмотрении полидисперсных частиц, наталкивает на мысль, что существует оптимальный размер частиц. Рассмотрение частиц с размером более 1 мкм нецелесообразно, так как стабилизировать такую взвесь крайне сложно, а использование частиц таких размеров недопустимо в теплообменном оборудовании.

Рассмотрено влияние на теплообмен монодисперсных частиц Al_2O_3 с размерами 54, 200 и 500 нм. Добавка частиц с размером 54 нм приводит к ухудшению теплообмена. Зафиксировано наличие минимума плотности теплового потока на режиме $T_w = 464$ °C, $T_f = 64$ °C с массовой концентрацией $\omega \approx 0,8$ %. Это подтверждается высокой длительностью остывания образца. Превышение этой концентрации приводит к росту максимальной плотности теплового потока, однако до уровня, полученного при кипении воды, плотность теплового потока не возвращается.

Частицы Al_2O_3 с размерами 200 и 500 нм демонстрируют сходный с частицами - 54 нм характер воздействия на процесс. Снижение максимальной плотности теплового потока и увеличение времени остывания образца.

Эти результаты говорят о том, что монодисперсные частицы Al_2O_3 воздействуют на кипение не так как полидисперсные. При взаимодействии частиц с поверхностью формируется теплоизолирующий слой, который препятствует теплообмену. Полидисперсные взвеси, наоборот, при взаимодействии с поверхностью формируют развитую поверхность, которая улучшает теплообмен.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы сводятся к следующему.

1. Анализ литературы показал актуальность выбранного направления. Основным методом исследования в большинстве работ является термометрия, по результатам которой косвенно оценивают среднюю плотность теплового потока. Отсутствие методики, которая позволяет измерять местную плотность теплового потока, является коренным недостатком таких исследований.

2. Изготовлены и отградуированы гетерогенные градиентные датчики теплового потока, характеристики которых удовлетворяют условиям эксперимента.

3. Создан экспериментальный стенд, реализующий три метода исследования: градиентную теплотметрию, термометрию и высокоскоростную визуализацию. Созданы экспериментальные модели в форме цилиндра и шара, снабженные датчиками теплового потока и термопарами.

4. Методом градиентной теплотметрии получены значения местной плотности теплового потока при кипении насыщенной воды на перегретой модели в форме шара. Комплексная методика позволила сопоставить результаты теплотметрии с высокоскоростной визуализацией и термометрией, выделив границы режимов кипения.

5. Впервые комплексный подход, включающий градиентную теплотметрию, термометрию и высокоскоростную визуализацию, позволил оценить параметры теплообмена при кипении недогретой воды на перегретой поверхности.

6. Экспериментально определена местная плотность теплового потока на поверхности шара при кипении недогретой воды, многократно превышающая первую критическую.

7. Экспериментально исследована эффективность добавки в воду полидисперсной взвеси Al_2O_3 . При исходной температуре модели, равной 464°C , оптимальные массовые концентрации частиц ω и максимальная плотность теплового потока q составили:

- $\omega = 1\%$, $q = 9 \text{ МВт/м}^2$ при температуре воды 64°C ;
- $\omega = 1,6\%$, $q = 8,5 \text{ МВт/м}^2$ при температуре воды 73°C ;
- $\omega = 2,6\%$, $q = 7,9 \text{ МВт/м}^2$ при температуре воды 80°C .

При этих режимах зафиксирована максимальная плотность теплового потока в начале пузырькового режима кипения и минимальное время остывание модели.

8. Взвеси монодисперсных частиц Al_2O_3 размерами 54, 200 и 500 нм в диапазоне исследуемых концентраций 1 – 4 % ухудшает теплообмен. На поверхности модели формируется теплоизолирующий слой из налипших частиц.

9. Монодисперсные частицы TiO_2 размером 54 нм ухудшает теплообмен менее значимо, чем частицы Al_2O_3 того же размера. Частицы TiO_2 с размером 200 и 500 нм интенсифицируют теплообмен: длительность пленочного и переходного режимов сокращается, максимальная плотность теплового потока возрастает. Однако достичь максимальной плотности теплового потока, полученной при кипении полидисперсной взвеси, не удалось.

10. Выполненные эксперименты доказали применимость и информативность градиентной теплотметрии при исследовании теплообмена в оптически непрозрачных средах и в условиях, не допускающих визуального контроля.

Основные научные публикации по теме диссертации

1. Павлов, А. В. Градиентная теплотметрия в исследовании теплообмена при кипении в большом объеме недогретой воды и жидкости с добавлением микрочастиц Al_2O_3 / А. В. Павлов, П. Г. Бобылев, С. З. Сапожников // Теплоэнергетика. – 2023. – № 3. – С. 40-48. – DOI 10.56304/S0040363623030062

2. Pavlov, A. V. Gradient Heatmetry in Study of Heat Transfer during Pool Boiling of Subcooled Water and Liquid with the Addition of Al_2O_3 Microparticles / A. V. Pavlov, P. G. Bobylev, S. Z. Sapozhnikov // Thermal Engineering. – 2023. – Vol. 70, No. 3. – P. 194-202. – DOI 10.1134/s0040601523030060

3. Исследование теплообмена при кипении недогретой воды с добавлением микро- и наночастиц / П. Г. Бобылев, А. В. Павлов, Н. Е. Кикоть [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2023. – Т. 15, № 11. – С. 495-503

4. Sapozhnikov, S. Z. The local heat transfer coefficient determination during boiling a subcooled liquid on a superheated surface by the gradient heatmetry / S. Z. Sapozhnikov, A. V. Pavlov, P. G. Bobylev // XXXIX Siberian Thermophysical Seminar (STS-39) : Collection of conference materials.

Volume 459 (2023), Novosibirsk, 28–31 августа 2023 года. Vol. 459. – Les Ulis: EDP Sciences, 2023. – P. 05007. – DOI 10.1051/e3sconf/202345905007

5. Comprehensive study of boiling regimes with use of high-speed imaging and gradient heatmetry / S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. V. Mityakov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series : 16, Moscow, 28 июня – 02 2021 года. – Moscow, 2021. – P. 012058. – DOI 10.1088/1742-6596/2127/1/012058.

6. Исследование кипения на поверхности шара методом градиентной теплометрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2021. – Т. 13, № 10. – С. 434-441. – DOI 10.34759/tpt-2021-13-10-434-441