

На правах рукописи



РЮТИН Сергей Борисович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПЕРСПЕКТИВНЫХ
ТЕПЛОНОСИТЕЛЯХ ПРИ МОЩНОМ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Екатеринбург – 2015

Работа выполнена в лаборатории быстропротекающих процессов и физики кипения Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Скрипов Павел Владимирович

Официальные оппоненты: **Ивлиев Андрей Дмитриевич**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГАОУ ВПО «Российский государственный профессионально-педагогический университет», профессор кафедры физико-математических дисциплин

Волков Николай Борисович, доктор физико-математических наук, ФГБУН Институт электрофизики Уральского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией нелинейной динамики

Ведущая организация: **ФГБУН Институт теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук**

Защита состоится «27» марта 2015 г. в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.285.02 на базе ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина по адресу: 620049, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19, ауд. И-420

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», <http://dissovet.science.urfu.ru/news2/>

Автореферат разослан « » 2015 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета

Ищенко Алексей Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Изучение закономерностей теплопереноса в перспективных теплоносителях при мощном локальном тепловом воздействии является актуальной задачей теплофизики, являясь частью более широкой проблемы поиска средств интенсификации теплообмена для нужд теплоэнергетики. Уникальные свойства нанофлюидов (далее – НФ) и сверхкритических флюидов (далее – СКФ) позволяют рассматривать их в качестве перспективных теплоносителей в теплоэнергетике. Тем не менее, в силу структурной неоднородности таких сред и недостаточной изученности процессов тепломассопереноса в них, остается множество нерешенных вопросов, в том числе фундаментального плана, которые являются серьезным препятствием для применения НФ и СКФ именно в качестве теплоносителя. Также остро ощущается дефицит экспериментальных подходов для изучения таких объектов, в частности, остался совершенно неизученным важный предельный случай практически кондуктивного теплопереноса.

В современной научной литературе НФ отводится роль теплоносителей будущего, предполагая существенное улучшение их тепловых характеристик по сравнению с базовой жидкостью. Наш анализ состояния изучения теплообмена в НФ показал, что опытные данные по тепловой проводимости НФ представляют из себя противоречивую картину, общепринятого теоретического подхода также пока не существует. Основным экспериментальным методом изучения теплопереноса в НФ является метод нестационарного нагрева проволочного зонда для измерения теплопроводности (в англоязычной научной литературе – “Transient Hot-Wire technique”, сокращенно THW). Отметим, что опытные данные получены в узком интервале температур, в основном, в окрестности комнатной температуры, в отдельных работах – до 140 °С. Также отметим и невысокую чувствительность THW-метода, вынуждающую исследователей работать с очень большим содержанием наночастиц в НФ, порядка единиц объемных процентов.

В отличие от нанофлюидов, изучение сверхкритических флюидов имеет давнюю историю. СКФ давно и успешно применяются в качестве теплоносителей,

в мире уже десятки лет сотни теплоэлектростанций работают на сверхкритической воде. Тем не менее, в области теплообмена с использованием в качестве теплоносителей СКФ, остается множество нерешенных проблем. Поиски их решения мотивированы широко обсуждаемой в настоящее время проблемой создания ядерных реакторов 4-го поколения, охлаждаемых легкой сверхкритической водой. Удивительно, но остался совершенно неизученным теплоперенос в СКФ вне зоны конвективного теплообмена. Отметим два существенных момента. Во-первых, не существует теоретической модели, способной описать все режимы теплообмена, обнаруженные в опытах, во-вторых, все экспериментальные работы выполнены в квазистационарных режимах теплообмена. Анализ состояния обсуждаемых проблем послужил мотивацией для разработки нового метода изучения теплопереноса при мощном локальном тепловом воздействии и его апробации в таких перспективных и, одновременно, недостаточно изученных объектах, как НФ и СКФ. Создаваемые при этом в эксперименте условия дают уникальную возможность изучения особенностей практически кондуктивного теплопереноса, обеспечивая доступ к информации, которую невозможно получить никаким другим способом.

Объект исследования: жидкие теплоносители, в том числе, в не вполне устойчивых состояниях системы. К не вполне устойчивым системам будем относить системы, которые теряют устойчивость в процессе нагревания.

Цель работы: исследование особенностей теплопереноса при мощном локальном тепловыделении в нанофлюидах (в зависимости от природы базовой жидкости, концентрации и размеров наночастиц) и в сверхкритических флюидах в широком интервале сверхкритических давлений.

Для достижения цели работы был создан метод, базирующийся на управлении мощностью нагревателя–зонда и удовлетворяющий системе специфических требований.

Научная новизна

1. Создан метод, обеспечивающий управление мощностью нагревателя – зонда с целью изучения особенностей теплопереноса в импульсном процессе

при мощном локальном тепловыделении, защищенный патентом на полезную модель.

2. Разработана методика сопоставления теплового сопротивления изучаемых объектов в зависимости от изменения внешнего параметра (концентрация, давление и т.п.).

3. Применение созданной методики к нанофлюидам позволило в разы расширить интервал температуры в сравнении с известными данными, вплоть до температур спонтанного вскипания, а также уверенно разрешать область сверхмалых концентраций наночастиц (10^{-2} объемн. %), что недостижимо другими методами. Обнаружен немонотонный ход теплового сопротивления нанофлюида в зависимости от концентрации относительно теплового сопротивления базовой жидкости.

4. Впервые в эксперименте осуществлен быстрый перевод вещества из пересжатого состояния в область сверхкритических температур по изобаре, что позволило наблюдать теплоперенос в сверхкритических флюидах вне зоны конвективного теплообмена.

5. Впервые обнаружен эффект порогового снижения интенсивности теплопереноса при заходе в область сверхкритических температур по изобаре и установлен диапазон давлений, при котором он наблюдается ($1,0 \div 3,0$) p/p_c .

Достоверность результатов обеспечивается: проверкой методики на различных объектах, в том числе, на общепринятых в теплофизических измерениях эталонах; применением для оценки погрешностей измерения электрических величин приборов, внесенных в Государственный реестр средств измерения; признании развитой методики измерений в качестве Государственного стандарта; обсуждением результатов работы на конференциях; получением рецензий от ведущих специалистов.

Теоретическая и практическая значимость работы

Фундаментальная значимость работы связана с получением новых знаний о закономерностях теплопереноса в нанофлюидах и сверхкритических флюидах в условиях мощного локального тепловыделения. Для сверхкритических флюидов

полученное знание существенно уточняет физическую картину явлений переноса в сверхкритической области параметров.

В опытах с НФ удалось уверенно разрешать влияние сверхмалых концентраций наночастиц ($\sim 0,01$ объемных %) на условия теплообмена. Освоенный в опытах диапазон температур расширен до сотен градусов, вплоть до температуры спонтанного вскипания базовой жидкости при заданном давлении. Таким образом, осуществлена возможность значительно более адекватной оценки применения НФ именно в качестве теплоносителя. Применительно к нанофлюидам, методика аттестована в качестве Госстандарта.

В опытах с СКФ обнаружен практически важный эффект, заключающийся в пороговом снижении интенсивности теплопереноса при заходе в область сверхкритических температур по изобаре, и диапазон давлений, при котором эффект проявляется. Этот результат позволил сформулировать рекомендации по выбору рабочего давления теплообменных устройств, работающих на сверхкритических теплоносителях.

Высокая чувствительность и быстроедействие метода делают возможным его широкое применение для сопоставления эффективности конкурирующих образцов теплоносителей в условиях мощного тепловыделения.

Положения, выносимые на защиту

1. Созданная методика сопоставления теплового сопротивления различных образцов теплоносителей в строго заданных условиях тепловыделения позволяет разрешать малые изменения условий теплообмена, соответствующие малым изменениям состава образца или внешнего параметра.

2. Немонотонный ход изменения теплового сопротивления нанофлюидов в зависимости от концентрации обусловлен влиянием межфазного термического сопротивления (твердое тело/жидкость) и размерного эффекта теплопроводности материала имплантируемых в базовую жидкость частиц.

3. Пороговое снижение интенсивности теплопереноса при быстром изобарном заходе в область сверхкритических параметров обусловлено

нарушением однородности вещества, что в общем случае сопровождается появлением дополнительного теплового сопротивления.

Личный вклад автора: Все представленные в работе результаты, разработка методики, создание экспериментальной установки, проведение экспериментов, обработка полученных результатов, подготовка основных публикаций, сделаны лично автором или при непосредственном его участии.

Апробация работы. Результаты работы докладывались: на II конференции «Наноматериалы и технологии» (Улан-Удэ, 2009), на XXIX и XXXI Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2010, 2014), на XIII РКТС (Новосибирск, 2011 г.), в качестве приглашенных докладов – на XII (2011) и XIII (2012) всероссийских школах-семинарах по проблемам физики конденсированного состояния вещества, на семинаре "Тепломассообмен и механика невесомости" в ИПМ им. А.Ю. Ишлинского РАН, на международных конференциях Nanofluids: Fundamentals and Applications II (Montreal, Canada, 2010), 19th (Aristotle University of Thessaloniki, Greece, 2011) и 20th (University of Lisboa, Portugal, 2014) European Conference on Thermophysical Properties, 18th Symposium on thermophysical properties (Boulder, CO, USA, 2012), на VII Научно-практической конференции «Сверхкритические флюиды: фундаментальные основы, технологии, инновации» (г. Зеленоградск, Калининградская обл., 2013), на заседании Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (IAPWS, Moscow, 2014).

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 10-08-00538-а, № 13-08-00428) и Программой президиума УрО РАН «Арктика».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 12 научных работ, в том числе, методика ГСССД, патент на полезную модель, 7 статей в журналах из перечня ВАК и 3 статьи в материалах конференций.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы из 88 наименований и содержит 118 стр. основного машинописного текста, 50 рисунков, 2 таблицы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор современного состояния проблем изучения теплообмена в нанофлюидах и сверхкритических флюидах, в ракурсе применяемых для этого экспериментальных методов. Глава завершается постановкой задачи.

Анализ состояния проблемы изучения НФ позволил сформулировать следующий вывод: во-первых, практика показала, что результаты опытов чувствительны к возмущающему действию факторов, присущих именно НФ. В частности, результаты могут нести отпечаток седиментационной неустойчивости системы и склонности наночастиц к взаимодействию друг с другом, а также с поверхностью датчиков. Модифицирование наночастицами, например, поверхности нагревателя-зонда в ходе опыта сопровождается значительным (и трудноучитываемым) повышением плотности теплового потока. Влияние фактора, связанного с взаимодействием наночастиц друг с другом, может быть уменьшено подбором значения ζ -потенциала, но не может быть исключено. И агрегация, и агрегация наночастиц приводит к изменению тепловой проводимости нанофлюида при формально одинаковом соотношении компонентов суспензии. В этом плане приобретает значение размерный эффект тепловой проводимости материала, свойственный для наночастиц. Например, эффективная теплопроводность диоксида алюминия изменяется в несколько раз при изменении размера частицы от 50 до 10 нм, во-вторых, малая ширина температурного интервала, в котором поставлены опыты (по сути, большинство опытов проведено в окрестности комнатной температуры), не дает оснований ни для объяснения имеющихся различий в результатах по температурной зависимости теплофизических свойств НФ, ни для экстраполяции этих результатов в область повышенных или пониженных температур, свойственных для работы реальных устройств в термонапряженных режимах. Обзор работ по теплообмену в СКФ показал, что, несмотря на историю в несколько десятилетий и

огромное количество теоретических и экспериментальных работ, проблема еще очень далека от своего решения. Анализ методик экспериментов, представленных в цитируемой литературе, показывает, что все эти работы выполнены в квазистационарных режимах. Соответственно, остался совершенно неизученным важный предельный случай, соответствующий малым временам воздействия и большим плотностям теплового потока, позволяющий оказаться вне зоны конвективного теплообмена.

Обзор экспериментальных подходов к исследованию нанофлюидов и сверхкритических флюидов естественным образом приводит к выводу об обоснованности поиска новых экспериментальных методов для изучения таких объектов. Метод должен обеспечить возможность проведения опытов во всей области существования конденсированной фазы вещества, включая области перегретых жидкостей и сверхкритических флюидов. Такой подход предполагает достижение больших значений приращения температуры в опытах. Поскольку при больших значениях приращения температуры (сотни градусов) линейные модели, принятые в ТНВ-методе, оказываются неприменимыми, необходимо создать методику сопоставительных опытов в строго заданных условиях тепловыделения на зонде. Наиболее приемлемым вариантом представляется вариант управляемого нагрева с управлением мощностью, рассеиваемой на системе зонд-среда. Управление именно мощностью обеспечивает одинаковое значение энергии для любого момента времени от начала импульса, независимо от изменения сопротивления зонда и свойств изучаемой среды. Это создает основу для количественного сопоставления наблюдаемых в опытах картин теплопереноса в зависимости от изменения внешних параметров. Предполагаемый диапазон длительности теплового воздействия составляет единицы-десятки миллисекунд, что обеспечит достаточную чувствительность метода и позволит оставаться вне зоны конвективного теплообмена.

Во второй главе представлен метод управления мощностью нагревателя и устройство его осуществления. Подробно описан схмотехнический подход к созданию устройства, приведены блок-схема и принципиальная схема основного

узла установки. Приведено описание системы регистрации измеряемых величин, обсуждены методические детали, методика проведения опытов и погрешности измерений.

Сама по себе идея управления мощностью в процессе импульсного нагрева не нова. В первую очередь, управление было востребовано в экспериментах по измерению теплопроводности веществ методами нестационарного нагрева проволочного зонда (ТНВ-методы). В основе ТНВ-методов лежит точное решение уравнения теплопроводности в случае остывания (нагрева) цилиндра бесконечной длины в сплошной среде. Важнейшим условием его реализации является постоянство теплового потока по ходу импульса, которое может быть обеспечено только в случае постоянства мощности, рассеиваемой на нагревателе-зонде. Выполнение этого условия оказалось сложной задачей, что вынудило исследователей отказаться от применения стабилизации мощности в пользу разного рода способов пересчета опытных данных. Наибольшую трудность представляет обеспечение устойчивости работы устройства электронного управления мощностью нагревателя. С точки зрения теории автоматического управления устройство является многомерным, поскольку число входов регулятора больше, чем один. Кроме того, устройство является существенно нелинейным, т.к. в петле обратной связи с двумя исходными величинами, изменяющимися во времени (ток через зонд и падение напряжения на зонде), производится нелинейная операция их умножения друг на друга. Объект управления – тонкий проволочный зонд – является существенно нестационарным объектом, поскольку его сопротивление изменяется в разы в процессе импульсного нагрева, а величина этого изменения зависит от свойств вещества, в которое погружен зонд. Свойства вещества, в свою очередь, значительно и нелинейно изменяются в процессе нагрева, в нем могут происходить фазовые и химические превращения. Указанные выше обстоятельства делают практически невозможным применение аналитического аппарата теории автоматического управления для решения поставленной задачи. В решении оставалось полагаться на собственный опыт и интуицию разработчика электронных устройств.

Основная идея применения созданного устройства заключается в исследовании процессов теплопереноса в системе зонд-вещество при систематическом изменении внешних параметров (концентрация, давление) в **строго заданных** условиях нагрева при мощном тепловыделении (порядка 1–20 МВт/м²). Длительность импульса выбиралась в интервале 1–10 мс. Относительно короткие времена нагрева позволяют наблюдать близкий к кондуктивному теплоперенос, сводя практически к нулю влияние конвекции (в некоторых случаях – гравитации), существенно затрудняющей интерпретацию результатов опытов. Таким образом, становится осуществимым важный предельный случай теплопереноса. Он дает доступ к информации, которую невозможно получить никаким другим способом. При любой форме управляющего импульса энергия, сообщенная системе зонд/среда, будет одинакова для любого момента времени от начала импульса, независимо от масштаба изменения сопротивления зонда, изменения теплофизических свойств вещества с температурой, наличия (или отсутствия) фазовых и химических превращений в веществе. На этой основе была создана методика количественного сопоставления параметров теплопереноса в различных объектах изучения. На Рисунке 1 представлена блок-схема созданной экспериментальной установки.

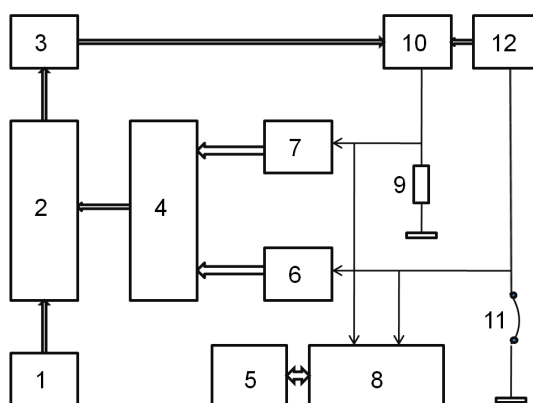


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки. 1 – генератор управляющего импульса; 2 – устройство выделения рассогласования; 3 – усилитель рассогласования; 4 – аналоговый перемножитель; 5 – персональный компьютер; 6 – масштабирующий усилитель падения напряжения, регистрируемого на зонде; 7 – масштабирующий усилитель падения напряжения, регистрируемого на точном токовом резисторе; 8 – АЦП; 9 – точный токоизмерительный резистор; 10 – силовой управляющий элемент; 11 – проволочный зонд; 12 – гальванически изолированный источник питания.

Ключевым условием применимости методики для сопоставления свойств набора образцов служит наличие повторяемости параметров нагрева зонда в серии последовательных измерений. В качестве примера, характерные кривые изменения температуры и мощности нагрева зонда в гексадекане при атмосферном давлении в серии последовательных импульсов показаны на Рисунке 2. Как можно видеть из Рисунка 2, разброс значений мощности составляет величину менее 0,04 %. Этому уровню повторяемости параметров нагрева соответствует разброс траекторий нагрева менее 0,3 °С при температурах, близких к температуре спонтанного вскипания вещества. Достигнутая точность повторяемости параметров нагрева и устойчивость работы экспериментальной установки оказались приемлемыми для проведения измерений в НФ в области сверхмалых концентраций (порядка 0,01 объемных %) наночастиц и в СКФ.

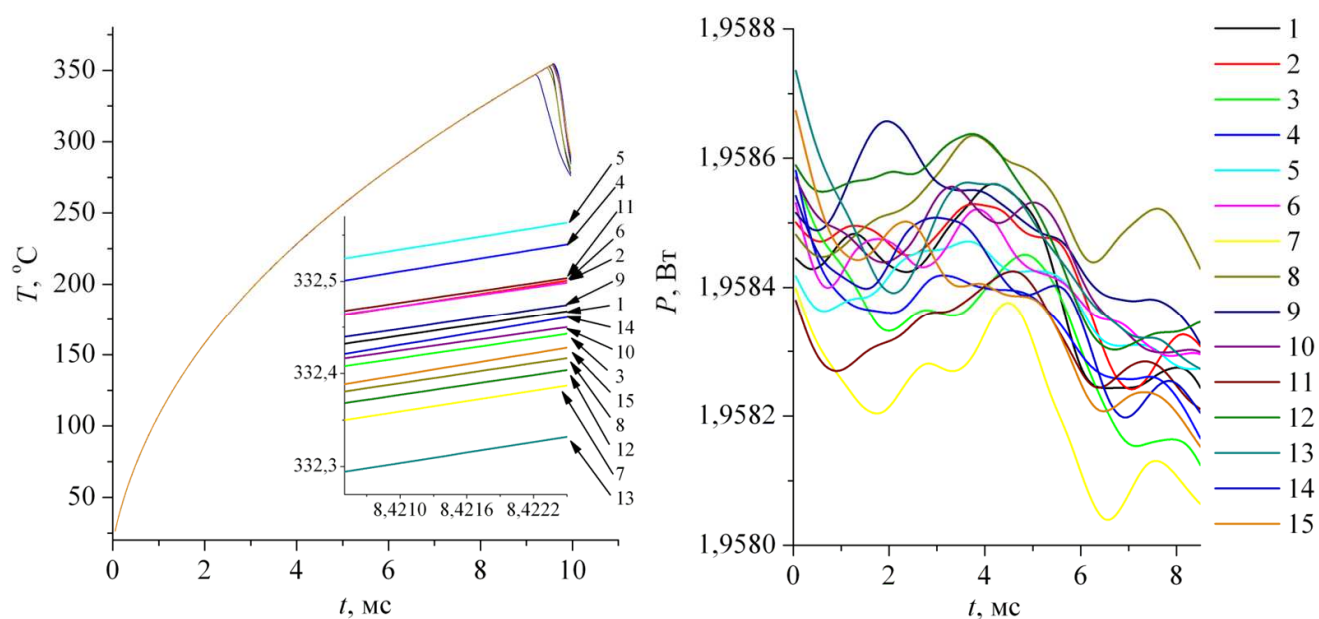


Рис. 2. Траектории нагрева зонда $T(t)$ (слева) и соответствующие траектории значения мощности (справа) в серии измерений на гексадекане при атмосферном давлении. Цифры у кривых показывают номер импульса в серии из 15 измерений.

Из соображений наибольшей определенности в интерпретации результатов, в качестве основного теплового режима зонда был выбран режим постоянной мощности. В опытах отслеживается изменение среднемассовой температуры зонда во времени $T(t)$ при заданном значении мощности нагрева P . Непосредственно измеряемыми в опыте величинами служили падения

напряжения на зонде и на токоизмерительном резисторе (Рисунок 1). Этих данных достаточно для расчета плотности теплового потока через поверхность зонда (1) и теплового сопротивления вещества (2) при заданном воздействии:

$$q = (P - P_{Pt})/\pi \cdot d \cdot l, \quad (1)$$

$$R_{\lambda}(t) = \Delta T(t)/q, \quad (2)$$

где d , l – диаметр (20 мкм) и длина зонда (1 см); $\Delta T(t)$ – температурный напор; $P_{Pt}(t)$ – доля мощности, затрачиваемая на нагрев собственно зонда, для любого момента времени t . В наших опытах значение P_{Pt} не превышало $0.1 \cdot P$. В общем случае поправка P_{Pt} может быть вычислена с привлечением данных по плотности и теплоемкости материала зонда (платины) для заданных условий опыта (d , l , ΔT) или оценена в специальном опыте при условиях, приближенных к адиабатическим условиям.

Погрешность определения площади поверхности зонда $\pi \cdot d \cdot l$ на порядок превосходит погрешности в определении других величин. Поэтому, был выбран относительный вариант метода. При нахождении отношения теплового сопротивления образцов “неудобная” площадь поверхности из рассмотрения исключается. Присущая любому зондовому методу систематическая погрешность, обусловленная, в частности, концевыми эффектами и ненулевой теплоемкостью зонда, также существенно компенсируется. В приближении нулевой теплоемкости зонда, уместной в нашей постановке опытов, задача сводится к нахождению отношения $\Delta T_i/\Delta T_0$ для избранных значений P и t , где индексы “i” и “0” относятся к образцам НФ и к базовой жидкости, соответственно (для СКФ “i” и “0” относятся к ряду давлений, одно из которых, выбранное в качестве базового, обозначается индексом “0”). Оценка погрешностей измерения абсолютных величин среднемассовой температуры зонда и мощности составляет: $\delta T = 1,1\%$ и $\delta P = 0,7\%$, соответственно. Влияние рассмотренных выше погрешностей измерения и расчета абсолютных значений $T(t)$ и $P(t)$ становится пренебрежимо малым при расчете относительного теплового сопротивления $R_{\lambda i}/R_{\lambda 0}$. Оценка погрешности расчета отношений тепловых сопротивлений $R_{\lambda i}/R_{\lambda 0}$ оценивается в величину: $\delta_{R_{\lambda i}/R_{\lambda 0}} \approx 0,2\%$.

В третьей главе приведены результаты опытов с НФ и их обсуждение.

Сотрудниками лаборатории импульсных процессов ИЭФ УрО РАН и лаборатории прикладного магнетизма ИФМ УрО РАН в рамках проекта РФФИ проведено исследование условий получения устойчивых суспензий на основе нанопорошков для проверки возможности использования таких суспензий в качестве теплоносителей. Решение задачи получения нанопорошков оксидов металлов (Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , YSZ) опиралось на ранее освоенные методики их получения газофазным методом, методом электрического взрыва проволоки и методом лазерной абляции. В общем случае, суспензия является неустойчивой системой, что обуславливает принципиальную необходимость ее стабилизации. В ходе этих работ было установлено, что устойчивость суспензий обеспечивается применением полярных сольватирующих сред, в которых энтальпия смачивания на единицу удельной поверхности отрицательна и превышает некоторое значение ($0,25 \text{ Дж/м}^2$ для Al_2O_3) по абсолютной величине. Отметим одно важное обстоятельство. Приготовленные таким образом суспензии не содержат дисперсантов, применение которых является рядовой практикой. На Рисунке 3 показаны результаты аттестации наночастиц Al_2O_3 и YSZ и их суспензий в изопропанол. Геометрические размеры наночастиц и их распределение по размерам измерялись методом электронной просвечивающей микроскопии на микроскопе JEOL JEM 2100, удельная поверхность образцов определялась методом Брунауэра-Эммета-Тейлора на установке Micromeritics TriStar 3000. В качестве базовой жидкости использовались изопропанол и этиленгликоль.

Первые же пробные опыты по сопоставлению интенсивности теплопереноса в нанофлюидах показали, что мы имеем дело с очень сложным объектом исследования. В опытах был установлен факт взаимодействия наночастиц с поверхностью зонда, приводящий к модификации его поверхности, что может приводить, если не учитывать этот фактор, к ошибочной интерпретации получаемых в опыте результатов, вплоть до “*anomalous enhancement*”. Назовем этот эффект наноструктурированием поверхности зонда. С его учетом была разработана методика проведения опытов с НФ, смотри Рисунок 4.

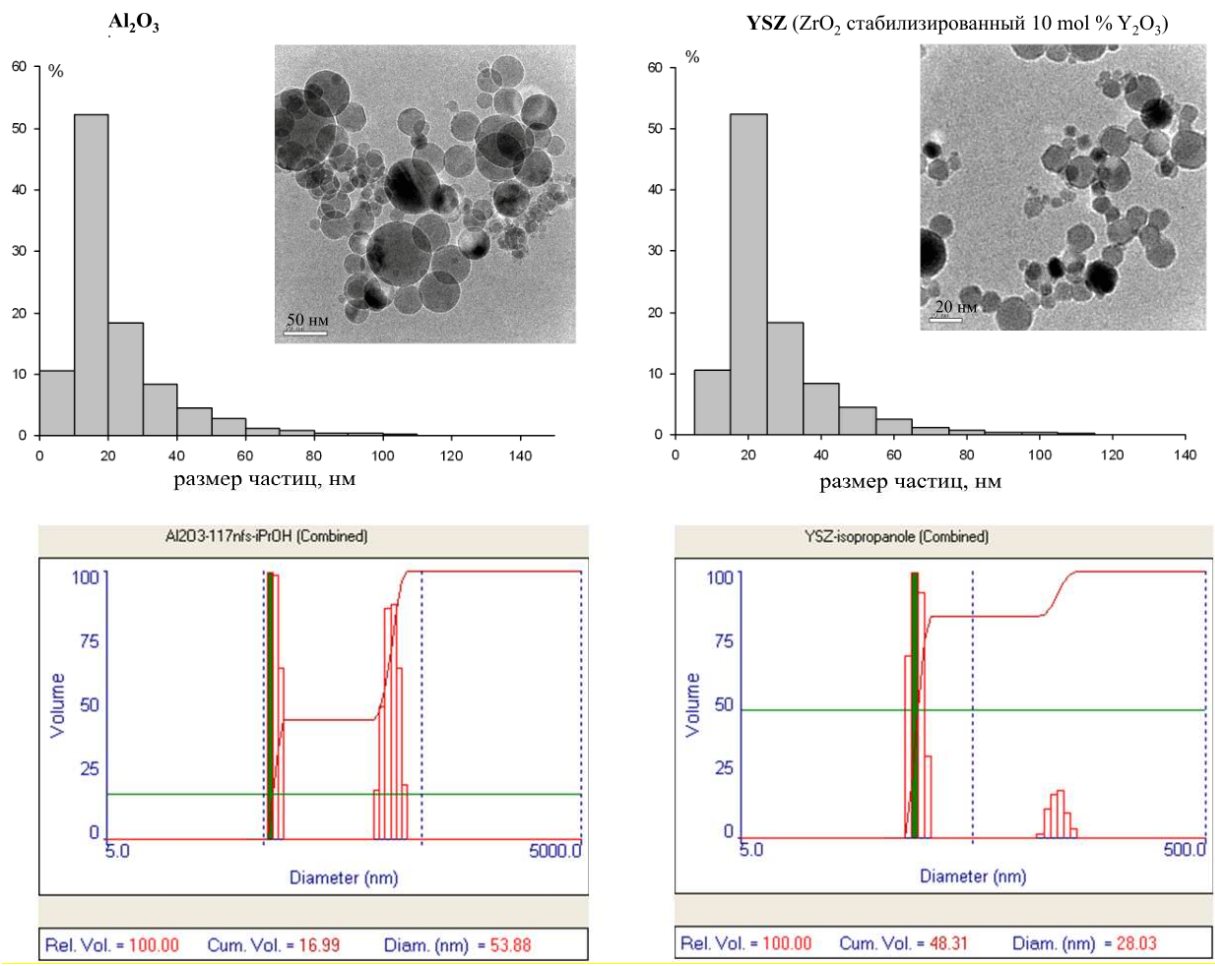


Рис. 3. Микрофотографии наночастиц Al₂O₃ и YSZ и их распределение по размерам (вверху). Размер индивидуальных частиц Al₂O₃ и YSZ и их агрегатов в суспензии в изопропанолe при содержании наночастиц 0,1 г/л (внизу).

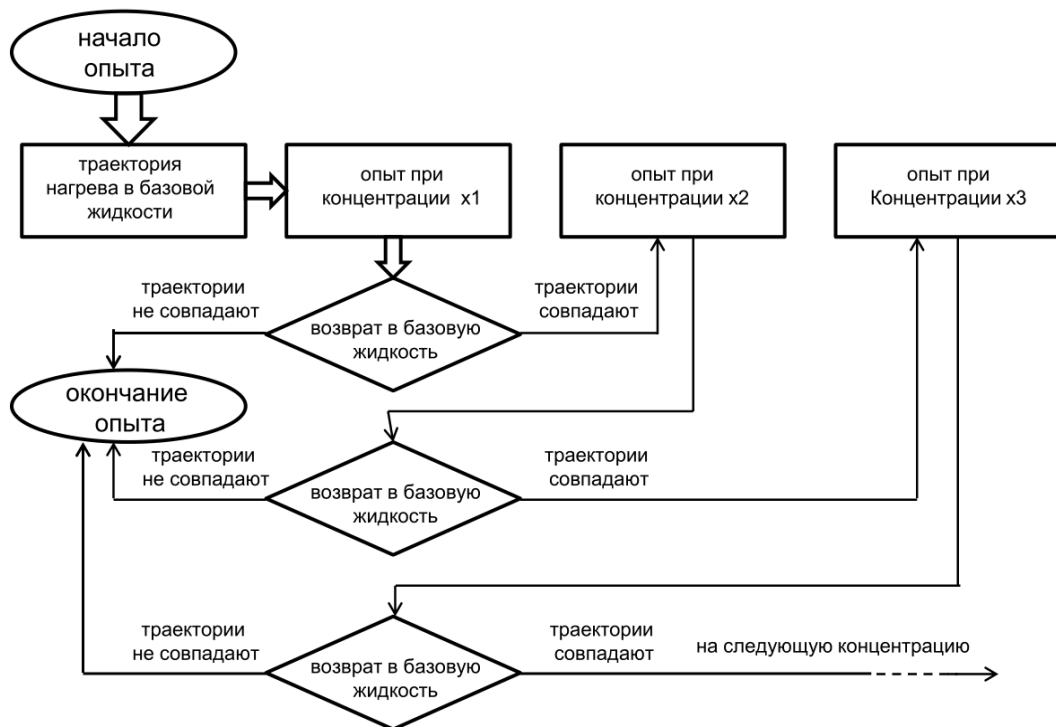


Рис. 4. Блок-схема методики проведения опытов с НФ.

Опыты при атмосферном давлении выявили, что зависимость относительного теплового сопротивления с ростом концентрации наночастиц может быть как монотонной, так и немонотонной (смотри Рисунок 5).

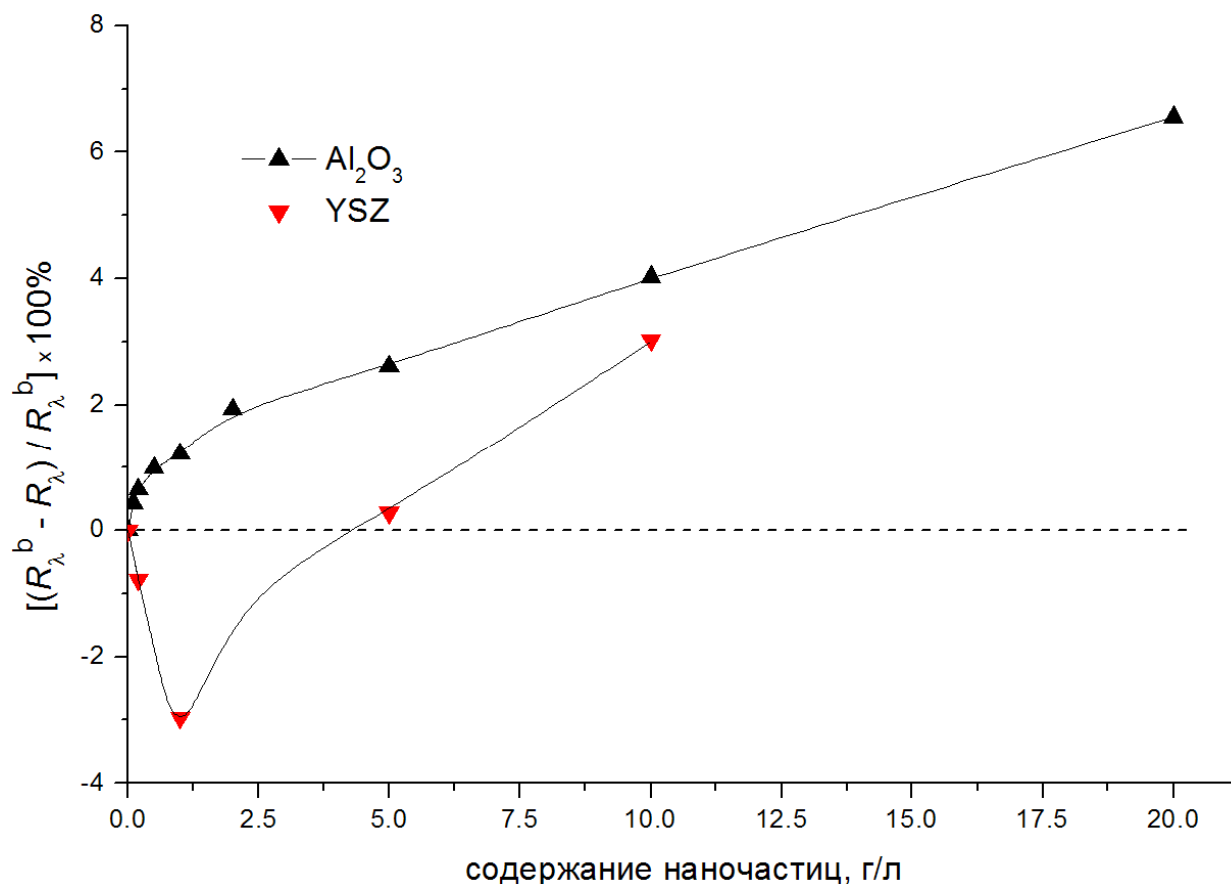


Рис. 5. Изменение теплового сопротивления нанофлюида при его импульсном нагреве в режиме постоянной мощности относительно теплового сопротивления базовой жидкости (изопропанол) в зависимости от содержания наночастиц Al_2O_3 и YSZ. Данные приведены для момента времени $t = 8,5$ мс и атмосферном давлении.

В четвертой главе представлены результаты опытов со сверхкритическими флюидами и их обсуждение. В опытах с СКФ, как и с другими объектами, отслеживаемым параметром служит среднемассовая температура зонда. Поэтому, задача попадания в ближнюю окрестность критической точки не ставилась. Опыты были проведены в широком интервале приведенного сверхкритического давления $(1,01 \div 6,0)p/p_c$ и температуры $(0,6 - 1,6)T_c$. Объектами изучения были изопропанол, малоново-диэтиловый эфир, ацетон и, в несколько более узком интервале параметров, вода.

Несмотря на то, что эти вещества принадлежат к различным химическим классам, выявленные картины теплопереноса в них несут явные элементы подобия. Пользуясь данным обстоятельством, приведем основные результаты для одного из веществ – изопропанола, смотри Рисунки 6,7.

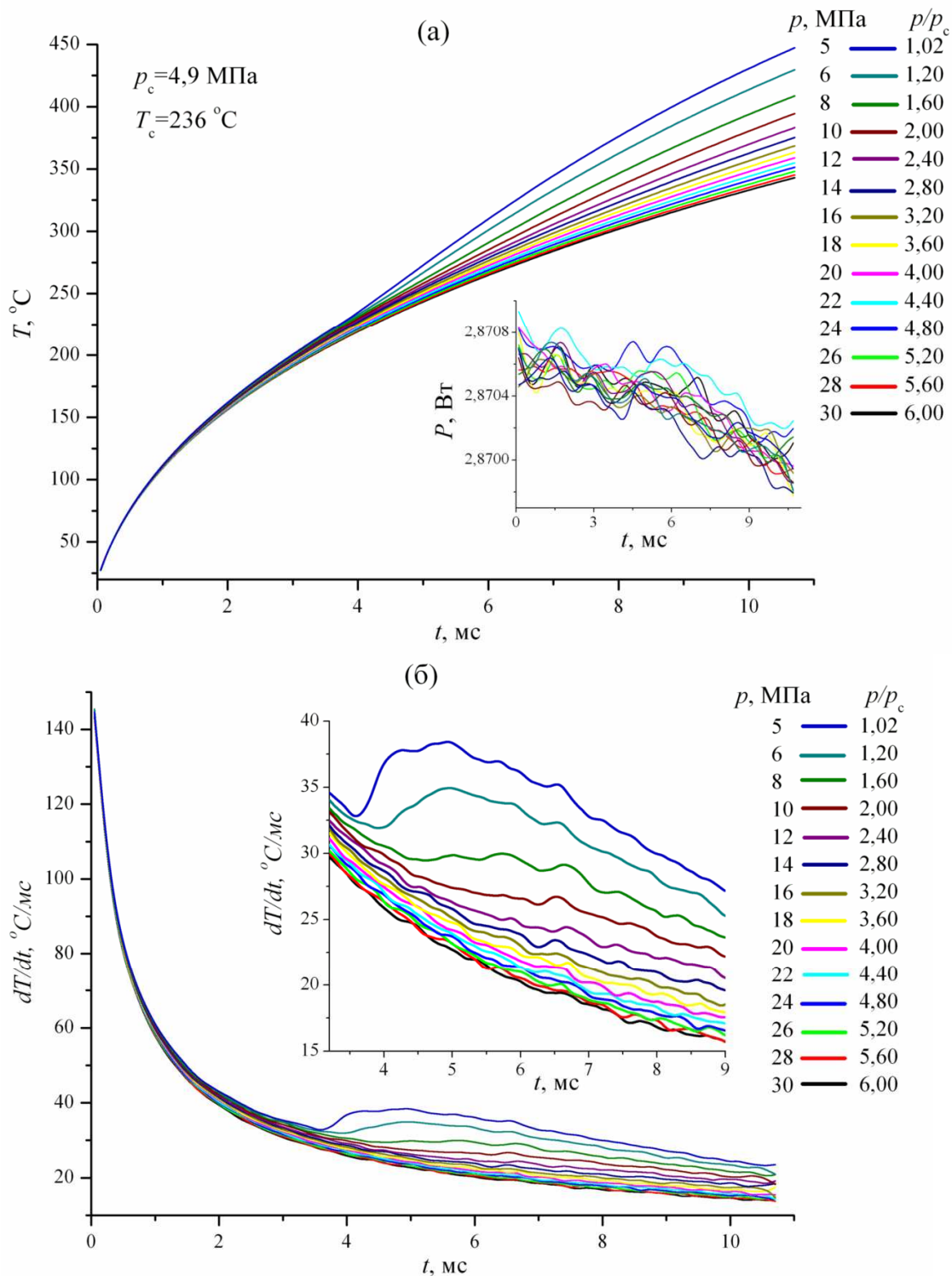


Рис. 6. Приращение температуры при нагреве зонда в изопропаноле в зависимости от времени (а) и производные от приращения температуры зонда по времени (б). Параметром является приведенное давление p/p_c в жидкости. На врезке в (а) показана повторяемость значений мощности в данной серии.

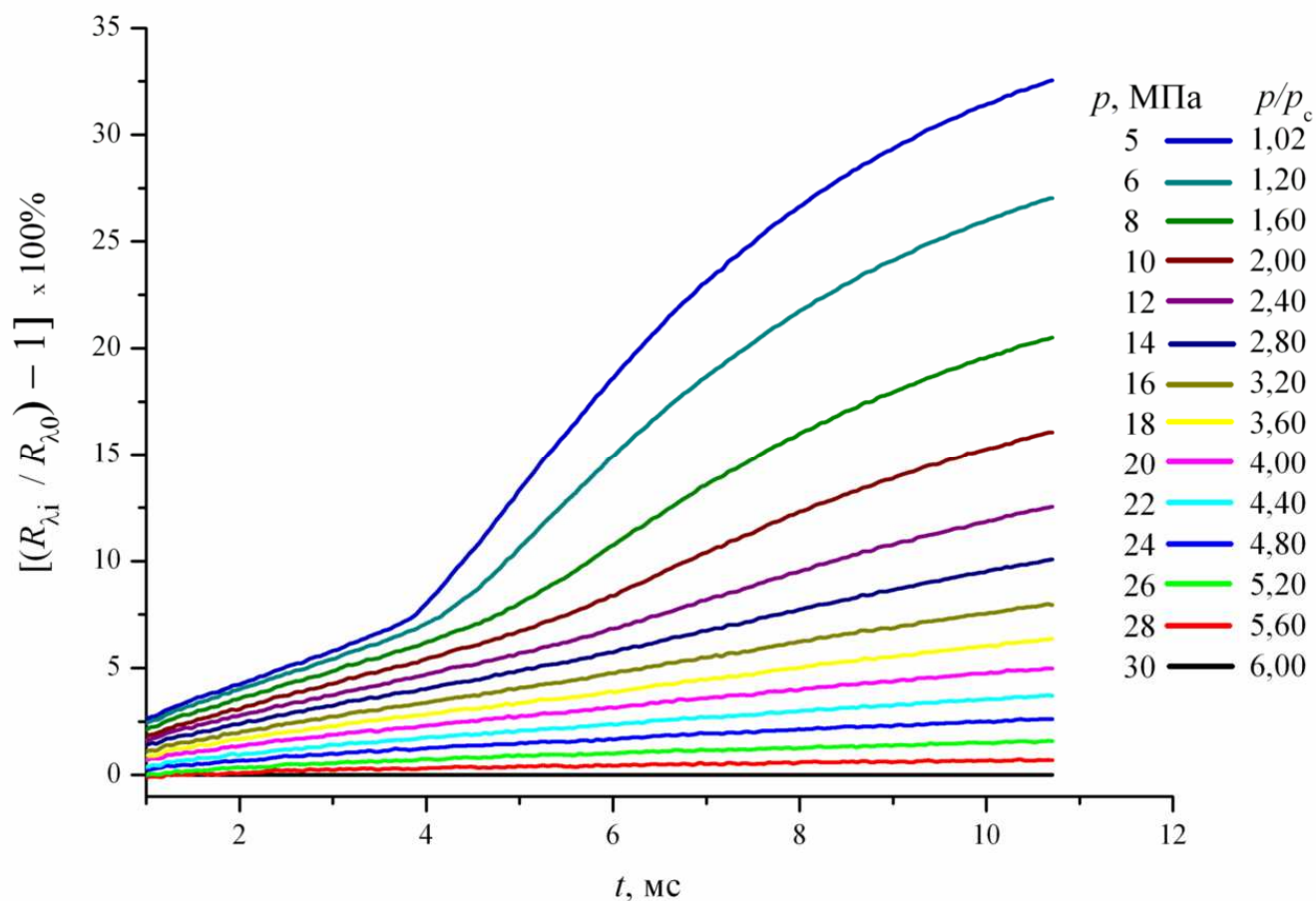


Рис. 7. Расчет относительного теплового сопротивления для изопропанола. Для расчета использованы данные Рисунка 6, а. В качестве базового давления выбрано максимальное значение давления в опыте.

Отметим, что методика работы по переводу пересжатой жидкости в область сверхкритических температур особенностей не имеет, поскольку система гомогенна по составу, результаты опытов хорошо воспроизводятся и выявленный эффект оказался неожиданно большим. Значение мощности подбиралось индивидуально для каждого вещества так, чтобы примерно 2/3 продолжительности импульса вещество находилось при сверхкритической температуре.

Оценивая основные результаты опытов, представленные на Рисунке 6, а, отметим, что веер траекторий нагрева резко расширяется при проходе области критической температуры. Траектории нагрева отклоняются в сторону более высоких температур и это отклонение тем больше, чем ближе давление к критическому значению. Отклонение траекторий нагрева в сторону высоких

температур однозначно свидетельствует об ухудшении условий отвода тепла от нагревателя–зонда к исследуемой жидкости. На графиках производных от траекторий нагрева, представленных на Рисунке 6, б, хорошо видно, что производные резко отклоняются вверх в окрестности критической температуры, образуя далее пологий максимум с ростом температуры. С ростом давления максимум на производных смещается в сторону более высоких температур и становится все более пологим, практически полностью вырождаясь в области $(2,5 \div 3,0) p/p_c$.

Наиболее важные выводы, которые можно сделать, изучив результаты опытов, таковы. Первое – картины теплопереноса при переходе пересжатой жидкости в область сверхкритических температур по изобаре подобны для изученных веществ; второе – наблюдается пороговое снижение интенсивности теплопереноса при заходе в область сверхкритических температур, выраженное тем сильнее, чем ближе значение давления к значению критического давления.

Обнаруженное в наших опытах пороговое снижение интенсивности теплопереноса при сверхкритических параметрах формально противоречит устоявшимся представлениям. Известно, что в опытах по теплообмену при свободной и вынужденной конвекции наблюдается пик теплоотдачи в ближней сверхкритической области. Чаще всего пик теплоотдачи связывают с максимумом теплоемкости в этой области. Также известно, что теплопроводность СКФ имеет максимум в окрестности критической точки. Таким образом, исходя из известных представлений, в наших опытах мы «должны» были увидеть рост интенсивности теплопереноса вблизи критической точки. Для прояснения ситуации было сделано сравнение опыта на воде с компьютерным экспериментом по нагреву зонда в воде при этих же условиях. Параметры зонда и греющего импульса были взяты из реального опыта. Данные по теплофизическим свойствам воды взяты из базы NIST. Установлено, что если в реальном опыте наблюдается полное отсутствие влияния пиков изобарной теплоемкости и избыточной теплопроводности, то в компьютерном эксперименте, «привязанном» к данным квазистатических опытов, такое влияние четко видно, смотри Рисунок 8.

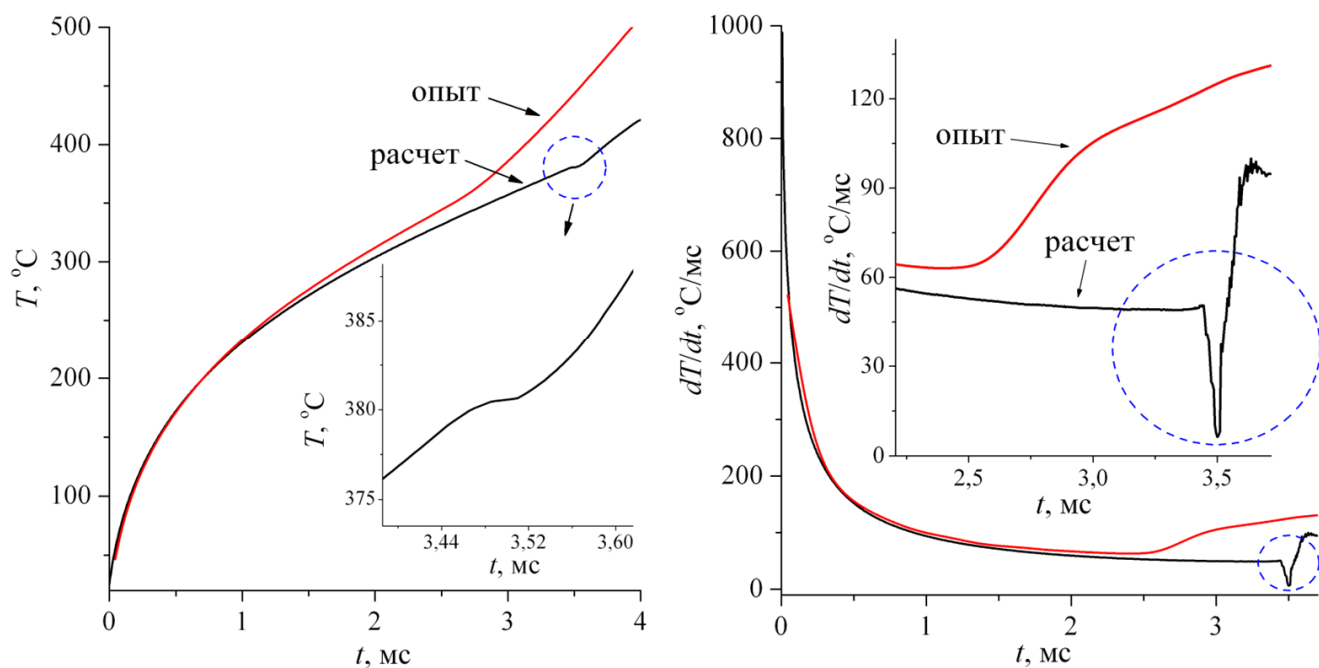


Рис. 8. Сравнение опыта и расчета по нагреву зонда в воде по изобаре 23 МПа. Приведены графики приращений температуры (слева) и производных по времени от них (справа). Область локального роста интенсивности теплопереноса выделена штриховым кружком. На экспериментальной кривой такая область отсутствует.

С использованием результатов опыта и расчета сделана оценка характерного пространственного (r^*) и временного (t^*) масштаба наших опытов:

$$\left(\frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right)^{-1} \sim r^* \qquad \left(\frac{1}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \right)^{-1} \sim t^*$$

где T – температура, t – текущее время от начала импульса, r – расстояние по нормали от поверхности зонда. Численная оценка этих величин такова:

$$t^* \sim 10 \text{ мс}; r^* \sim 15 \text{ мкм}.$$

В заключении обобщены результаты, полученные в опытах, сформулирован основной итог работы, намечены пути развития исследования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Создан метод управляемого импульсного нагрева зонда и создана экспериментальная установка для сопоставления интенсивности теплопереноса в жидких средах в масштабе малых характерных времен и размеров. Метод защищен патентом на полезную модель.

2. С помощью разработанного метода проведены опыты с двумя классами перспективных теплоносителей – нанофлюидами и сверхкритическими флюидами в широкой области изменения температуры (в импульсе) и давления. Для нанофлюидов созданная методика аттестована в качестве Государственного стандарта.

3. Установлено, что в зависимости от природы базовой жидкости, типа и размеров наночастиц, изменение относительного теплового сопротивления нанофлюида с ростом концентрации частиц может иметь как монотонный, так и немонотонный характер. Обнаружен факт взаимодействия наночастиц с поверхностью зонда, что является, с одной стороны, ограничением возможностей применения зондовых методик к таким объектам, с другой – указывает на возможность использования явления наноструктурирования поверхности в качестве технологии улучшения теплообмена в энергетике.

4. Обнаружен эффект порогового снижения интенсивности теплопереноса при переходе пересжатой жидкости в область сверхкритических температур по изобаре и установлен интервал давлений, в котором он проявляется: $1 \div 3,0 p_c$.

5. В опытах по переводу пересжатой жидкости в область сверхкритических температур по изобаре установлено подобие наблюдаемых картин теплопереноса для различных веществ, в отношении которых были проведены опыты, если рассматривать их в приведенных значениях давления p/p_c .

6. В отношении сверхкритических флюидов установлено отсутствие влияния на результаты наших опытов пиков избыточной теплопроводности и изобарной теплоемкости, известных из квазистационарных измерений, что было подтверждено с помощью компьютерного эксперимента, основанного на данных квазистатических опытов.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. Берглс. Интенсификация теплообмена // В кн.: Теплообмен. Достижения, проблемы, перспективы. Избранные труды 6-й международной

конференции по теплообмену, перевод с английского под редакцией чл.-корр. АН СССР Б.С. Петухова. М.: Мир, 1981. С. 145-192.

2. Скрипов, В.П., Метастабильная жидкость, главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1972, 312 С.

3. S.K. Das, S.U.S. Choi, W. Yu, T. Pradeep. *Nanofluids: Science and Technology*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

4. В.И. Терехов, С.В. Калинина, В.В. Леманов. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. 1. Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 1-15.

5. Beck M.P. Thermal Conductivity of Metal Oxide Nanofluids. PhD thesis. Georgia Institute of Technology, 2008.

6. Котов Ю.А. // О получении и исследованиях наноматериалов в ИЭФ УрО РАН. Вестник РАН. 2003. Т. 73, № 5. С. 435.

7. Pioro I.L. and Duffey R.B. Heat transfer and hydraulic resistance at supercritical pressures in power engineering applications. NY: ASME Press, 2007. 334 P.

8. Дубровина Э.Н., Скрипов В.П. Конвекция и теплообмен вблизи критической точки углекислоты // ЖПМТФ. 1965, №1. С. 115-119.

9. Курганов В.А., Теплообмен в трубах при сверхкритических давлениях теплоносителя: некоторые итоги научного исследования, Труды четвертой Российской конференции по теплообмену, 2006. Т.1. С. 74 - 83.

10. Горбатый Ю.Е., Бондаренко Г.В. Сверхкритическое состояние воды // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2007. Вып. 2. С. 5.

11. Кириллов П.Л., Лисичкин Ю.В., Новиков А.Г. О структуре воды в области сверхкритических параметров // X Росс. конф. по теплофизическим свойствам веществ (X РКТС). Тез. докл. Казань: КГТУ, 2002. С. X

12. Иванов Д.Ю. Критическое поведение неидеализированных систем. М.: Физматлит, 2003. 248 С.

13. Чайкина Ю.А. Развитие локальных конечных флуктуаций плотности, коллективной скорости и температуры в реальных флюидах // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2012. Том 7. № 1, С. 47-63.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в российских и зарубежных рецензируемых научных журналах, определенных ВАК России:

1. S.B. Rutin, P.V. Skripov. Apparatus for studying heat transfer in nanofluids under high-power heating // J. Eng. Thermophys. 2012. V. 21, № 2. P. 144–153. (0,56 п.л. / 0,28 п.л.)
2. S.B. Rutin, P.V. Skripov. Heat Transfer in Supercritical Fluids under Pulse Heating Regime // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 57, № 1. P. 126–130. (0,31 п.л. \ 0,16 п.л.)
3. С.Б. Рютин, П.В. Скрипов. Теплоперенос при сверхкритических параметрах импульсно нагреваемой жидкости // Сверхкритические флюиды: теория и практика. 2013. Т. 8, № 1. С. 87–97. (0,62 п.л. / 0,31 п.л.)
4. S.B. Rutin, P.V. Skripov. Investigation of not fully stable fluids by the method of controlled pulse heating. 1. Experimental approach // Thermochemica Acta. 2013. V. 562. P. 70–74. (0,31 п.л. \ 0,16 п.л.)
5. S.B. Rutin, A.A. Smotrinskiy, A.A. Starostin, Yu.S. Okulovsky, P.V. Skripov. Heat Transfer under High-Power Heating of Liquids. 1. Experiment and Inverse Algorithm // Int. J. Heat Mass Transfer. 2013. V. 62. P. 135–141. (0,43 п.л. / 0,1 п.л.)
6. S.B. Rutin, P.V. Skripov. Heat transfer under high-power heating of liquids. 2. Transition from compressed to supercritical water // Int. J. Heat Mass Transfer. 2014. V. 79. P. 526–531. (0,37 п.л. \ 0,2 п.л.)
7. С.Б. Рютин, А.Д. Ямпольский, П.В. Скрипов. Теплоперенос в сверхкритической воде при импульсном изобарном нагреве // Теплофизика высоких температур. 2014. Т 52, № 3. С. 481–484. (0,25 п.л. / 0,13 п.л.)

Патент на полезную модель:

1. П.В. Скрипов, С.Б. Рютин Устройство электронного управления мощностью нагревателя. Патент на полезную модель № 92728. Россия. G01N 25/00. Опубл. 27.03.2010. Бюл. № 9. (1,19 п.л. / 0,59 п.л.)

Методика ГСССД:

1. С.Б. Рютин, П.В. Скрипов. Методика экспериментального сопоставления теплового сопротивления наножидкостей в широкой области изменения температуры // Методика ГСССД МЭ 195-2012. (1,56 п.л. / 0,78 п.л.)

Другие публикации:

1. С.Б. Рютин, А.А. Смотрицкий, П.В. Скрипов. Метод постоянной мощности для исследования теплофизических свойств наножидкостей. Сборник трудов 2-й научно-практ. конф. с международ. участием «Наноматериалы и технологии». Улан-Удэ: БГУ, 2009. С. 107-110. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.)

2. Е.Г. Калинина, В.С. Рютин, С.Б. Рютин, А.П. Сафронов, П.В. Скрипов. Перенос тепла наножидкостями при импульсном тепловыделении // Тр. Всеросс. конф. XXIX Сибирский теплофизический семинар (СТС). Новосибирск: ИТФ СО РАН, 2010. Компакт-диск. 9 с. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.)

3. С.Б. Рютин, П.В. Скрипов. Перспективы применения наножидкостей в качестве рабочих тел термонапряженных процессов // Збірник наукових праць VIII Міжнародної наук.-техн. конф. Одеса: ОДАХ, 2012. С. 453–456. (0,12 п.л. / 0,06 п.л.)