

## **Отзыв официального оппонента**

на диссертационную работу Котова Артема Николаевича «Методы и средства исследования тепловой релаксации конденсированных сред при локальном импульсном воздействии с микросекундным разрешением», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Работа Котова Артема Николаевича посвящена разработке методов и экспериментальных установок для изучения динамики тепловых процессов при управляемом локальном импульсном воздействии на вещество по принципу «накачка-зондирование». Подобные процессы имеют место при фазовых переходах первого и второго рода, а также в результате ударных тепловых нагрузок с сильными градиентами температуры и давления. Возможность получения детальной и достоверной экспериментальной информации о динамике переходных тепловых режимов является необходимым условием для эффективного построения оборудования во многих отраслях промышленности. Сегодня создание подобного оборудования является важной составляющей для исследования новых материалов для микроэлектроники, сложных объектов химической промышленности и т.д.

В рамках работы Котова Артема Николаевича была проведена разработка электронных и волоконно-оптических устройств, позволяющих организовать контролируемое кратковременное воздействие на изучаемый объект на интервалах времени до  $10^{-9}$  с. Разработанные методы и устройства были успешно применены для экспериментального исследования импульсных тепловых процессов в малоразмерных образцах на микро- и субмикросекундных интервалах времени, в частности: для изучения особенностей теплообмена в системе зонд-перегретая жидкость по двухимпульсному методу с управлением тока нагрева; для анализа быстропротекающих процессов начальной стадии фазового перехода перегретой жидкости, активированного наносекундным лазерным импульсом; для выявления особенностей релаксации температурной неоднородности на поверхности образца.

### **Структура и содержание работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка использованной литературы из 93 наименований. Работа изложена на

133 страницах, содержит 2 таблицы и 66 рисунков. Общие выводы и перспективы дальнейшей разработки темы представлены в заключении.

Во введении сформулированы основные особенности проведения исследований в выбранном направлении предметной области, вводится понятие принципа «накачка-зондирование». Кратко представлено описание трех экспериментальных направлений, развиваемых в данной работе. Приведена актуальность темы исследования, научная новизна и практическая значимость, основные защищаемые положения.

В первой главе приводится обзор эволюции нестационарных теплофизических методов и экспериментальных установок, повлиявших на появление современных средств исследований быстропротекающих тепловых процессов. Основное внимание уделено методам, объединенным общим принципом «накачка-зондирование». Отдельно выделена группа методов импульсного нагрева тонкого платинового зонда, традиционно применяемая для исследования перегретых состояний жидкости в Институте теплофизики УрО РАН. Дано подробное описание метода нагрева нити двумя импульсами постоянного тока и особенностей работы одной из его первых аппаратных реализаций. Сделан вывод, что применимость метода в значительной степени зависит от возможности устройства варьировать основные параметры импульсного эксперимента: температуру и уровни токов нагрева. Показано, что применение оптических систем в теплофизических установках привлекательно с точки зрения возможности производить локальное управляемое тепловое воздействие с получением температурного сигнала отклика по оптическим каналам. Приводится описание принципа «накачка-зондирование», который, в основном, используется в контексте оптических средств организации импульсного воздействия на образец и измерения температурного отклика. Дано описание экспериментальных установок с применением волоконно-оптических систем. Сделан вывод о перспективности применения световодной техники для изучения тепловых свойств в установках различных конструкций для исследования скоростных процессов в конденсированных средах. Глава завершается постановкой задачи исследования.

Во второй главе описывается разработка устройства для управляемого двухимпульсного нагрева проволочного зонда по принципу «накачка-зондирование». Выдвигаются требования к устройству. Описываются состав устройства и принцип работы. Приводятся результаты по исследованию теплообмена в углеводородных жидкостях с малыми концентрациями воды, которые демонстрируют возможность применения устройства для оценки фазового состояния многокомпонентных систем.



В третьей главе дается описание разработанной оптоэлектронной системы, реализующей принцип «накачка-зондирование» и примененной для исследования динамических тепловых процессов в конденсированных средах. В состав системы входит схема на оптоволоконных компонентах, лазерные источники постоянного и импульсного излучения, фотодетектор и быстродействующая регистрирующая аппаратура.

В четвертой главе описываются опыты по активации вскипания и определению скорости переходных процессов на торце световода в перегретой жидкости по принципу «накачка-зондирование». Опыты проведены в миниатюрной пузырьковой камере, традиционно применяемой для определения зависимостей среднего «времени жизни» и частоты зародышеобразования в жидкости от температуры перегрева в строго контролируемых условиях.

В пятой главе рассмотрены разработанные метод и установка для исследования процессов тепловой релаксации на поверхности образцов металлов и полупроводников. Обсуждается постановка задачи, метод и конструкция установки для проведения опытов по принципу «накачка-зондирование» с использованием световодов. Проведено моделирование процесса термоупругой деформации при импульсном облучении лазерным пучком гауссовой формы, проведено сравнение экспериментальных данных с моделирующими расчетами.

В заключении подведены итоги и сформулированы основные результаты исследования. Основным итогом диссертационной работы автор считает возможность приложения разработанной техники и методов к современным теплофизическим исследованиям, в частности нестационарным и неравновесным тепловым процессам в конденсированных средах.

**Степень обоснованности, достоверности, научная новизна, практическая и теоретическая значимость положений и выводов, сформулированных в диссертации**

Научные положения автора работы, вынесенные на защиту, в полной степени обоснованы, их достоверность подтверждается рядом публикаций в рецензируемых научных журналах, входящих в списки Web of Science и Scopus, а также патентом на изобретение. Теоретическая значимость работы заключается в разработке метода измерения скорости перемещения границы раздела пар-жидкость с использованием принципа лазерной доплеровской velocиметрии при вынужденном вскипании жидкости в широком диапазоне степеней перегрева. Разработан метод регистрации процесса тепловой релаксации микрометрического участка поверхности твердого образца после нагрева оптическим импульсом. Выявлена определяющая роль эффекта термодформации

поверхности на величину сигнала термоотражения в экспериментах с исследованием непрозрачных твердых образцов по принципу «накачка-зондирование» с передачей излучения через световод. Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения разработанного оборудования и методов для экспресс-диагностики технологических жидкостей и конструкционных материалов в экстремальных условиях. Научная новизна работы состоит в применении новых методов измерения, устройств и экспериментальных установок для исследования импульсных тепловых процессов в малоразмерных образцах на микро- и субмикросекундных интервалах времени, позволяющие проводить измерения в ранее недоступных условиях для кратковременно неравновесных состояний вещества (мониторинг процессов растворения примесей и расслаивания в растворах при изменении температуры; анализ движения паровой фазы на границе световод-перегретая жидкость; активация вскипания *n*-пентана импульсным лазерным излучением в зависимости от степени перегрева; температурная релаксация полупроводников Ge, ZnSe:Ni, InSb при криогенных температурах).

Полученные автором результаты являются новыми и имеют важное значение для исследования импульсных тепловых процессов и их приложений. Выводы по каждой главе полны, логичны и адекватны.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. На основе каких предположений была определена неопределенность измерения температуры методом импульсного нагрева, указанная в Главе 2, на стр. 40: «неопределенность измерения температуры в диапазоне от 100 °С до 300 °С не более  $\pm 1.8$  °С»?

2. С чем связаны значительные погрешности среднего времени жизни перегретой жидкости (рис. 4.5) при мощности активирующего излучения выше 300 мВт (импульс 2 нс) и 550 мВт (импульс 8 нс)?

3. При описании результатов по росту парового пузыря при импульсном вскипании (Глава 4, рис. 4.10, рис. 4.11, рис.13) было бы целесообразно привести графики, демонстрирующие эволюцию размера парового пузыря (его эквивалентного диаметра) при различных начальных температурах рабочей жидкости.

4. О каких именно «гидродинамических возмущениях», которые влияют на характер роста парового пузыря на торце световода идет речь на стр. 96?

5. В Главе 4, на стр. 100 автор приводит сравнение полученных в работе значений начальной скорости роста паровой фазы на торце световода с расчётами по формуле Рэлея для инерционной стадии. Целесообразно было привести подобное сравнение в виде



графика. Также стоило более детально описать механизмы, вследствие которых зависимости  $V(T)$  и  $V(p)$  (рис. 4.14) имеют линейный вид.

б. Ряд рисунков и графиков оформлены не в едином стиле (в том числе, часть с использованием кириллицы, часть – латиницы). Например, рис. 4.1 и 4.8, которые представляют, по сути, одну установку (миниатюрную пузырьковую камеру) следовало представлять либо на одном рисунке, либо оформлять их в едином стиле.

Отмечу, что число и содержание указанных замечаний не критичны для восприятия и анализа диссертационной работы, они не снижают высокую оценку научной и практической значимости полученных автором результатов.

### **Заключение по диссертации**

В целом диссертационная работа Котова Артема Николаевича «Методы и средства исследования тепловой релаксации конденсированных сред при локальном импульсном воздействии с микросекундным разрешением» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную на высоком уровне. В ней содержится решение задачи, имеющей важное значение для создания высокоточных средств для исследования импульсных тепловых процессов в малоразмерных образцах на микро- и субмикросекундных интервалах времени.

Содержание диссертации полностью соответствует научной специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики. Работа отвечает критериям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Содержание автореферата и сформулированные в нем выводы в полном объеме соответствуют представленным в диссертации результатам исследований. Публикации автора также отражают основные положения диссертации.

Основные результаты диссертационного исследования А.Н. Котова в полной мере опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Результаты диссертации были апробированы на профильных конференциях, среди которых Российская конференция по теплофизическим свойствам веществ РКТС-16, 2023, Всероссийская конференция по волоконной оптике ВКВО-2023, 2023; VIII Российская национальная конференция по теплообмену 2022; Международная научно-техническая конференция по современным методам и средствам теплофизических исследований 2015, 2017, 2019, 2021, 2023 г.

Считаю, что ее автор, Котов Артем Николаевич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2. Приборы и методы экспериментальной физики.

Сердюков Владимир Сергеевич,  
Кандидат физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
Старший научный сотрудник лаборатории низкотемпературной теплофизики  
Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1  
Телефон: +79537965420  
Электронная почта: [vsserd@gmail.com](mailto:vsserd@gmail.com)

  
\_\_\_\_\_  
/ Сердюков В.С. /

«27» мая 2024 г.

Подпись Сердюков В.С. заверяю:

*Ученый секретарь ИО СО РАН*  
*к.фр. - М. И.*

*Мамыров М. С.*