

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.129.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ИНСТИТУТА ТЕПЛОФИЗИКИ ИМ. С.С. КУТАТЕЛАДЗЕ
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 04.06.2025 № 5/2025

О присуждении Бойко Евгению Викторовичу, гражданину Российской Федерации, учёной
степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Термоакустика графеновых покрытий и влияние графенового покрытия на теплоотдачу» по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 02.04.2025, протокол № 2-2/2025 диссертационным советом 24.1.129.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1, приказы Минобрнауки России от 11.04.2012 № 105/нк, от 03.06.2021 № 561/нк.

Соискатель Бойко Евгений Викторович, 06.03.1994 года рождения, на момент защиты диссертации работает в должности младшего научного сотрудника в лаборатории синтеза новых материалов ИТ СО РАН. В 2018 году соискатель окончил магистратуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению «Физика», в 2022 году окончил очную аспирантуру Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Новосибирский национальный исследовательский государственный университет» по направлению подготовки 03.06.01 - Физика и астрономия.

Диссертация выполнена в научно-исследовательской лаборатории синтеза новых материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Научный руководитель – Смовж Дмитрий Владимирович, доктор физико-математических наук, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией синтеза новых материалов.

Официальные оппоненты:

Хвесьюк Владимир Иванович, доктор технических наук (01.04.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника), профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», профессор кафедры «Теплофизика»;

Пономарёв Александр Николаевич, доктор физико-математических наук (1.3.8. Физика конденсированного состояния), Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий лабораторией молекулярного имиджинга и фотоакустики – дали положительные отзывы на диссертацию Бойко Евгения Викторовича.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединённый институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва, в своем положительном заключении, утвержденном Петровым Олегом Федоровичем – академиком РАН, директором ОИВТ РАН, подписанном Шавелкиной Мариной Борисовной - д.ф.-м.н., ведущим научным сотрудником лаборатории 2.3 ОИВТ РАН, указала, что «Практическая значимость диссертационной работы Е. В. Бойко определяется тем, что автором экспериментально решена задача влияния поликристаллического графена на процесс теплоотдачи в окружающую среду, а также исследовано формирование звукового поля при термоакустическом эффекте у поверхности графенового покрытия. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы широким кругом специалистов, занимающихся изучением термоакустических преобразователей и контролем тепловых потерь. В работе представлено решение ряда актуальных задач, которые могут использоваться для дальнейшего развития теоретических моделей. Результаты работы целесообразно использовать в Институте космических исследований РАН, Объединённом институте высоких температур РАН, Институте общей физики им. А. М. Прохорова и других научных организациях, проводящих исследования в области теплофизики».

Соискатель имеет 25 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 15 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, опубликовано 5 работ, общим объемом 43 страницы. В диссертации недостоверных сведений об опубликованных соискателем ученой степени работах не содержится. Вклад автора состоял в подготовке и проведении всех представленных в работах экспериментов, анализе и интерпретации результатов, подготовке текста статей для публикаций.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации Бойко Евгения Викторовича:

1. Smovzh D.V., Kostogrud I.A., Boyko E.V., Matochkin P.E., Pilnik A.A. Joule heater based on single-layer graphene // *Nanotechnology*. – 2020. – V. 31. – №. 33. – P. 335704.
2. Смовж Д.В., Костогруд И.А., Бойко Е.В., Маточкин П.Е., Безруков И.А., Кривенко А.С. Синтез графена методом химического осаждения из газовой фазы и его перенос на полимер // *Прикладная механика и техническая физика*. – 2020. – № 5.
3. Boyko E.V., Kostogrud I.A., Pilnik A.A., Smovzh D. V. Thermoacoustics and Temperature Distribution on the Surface of a Polymer-Graphene Composite // *International Journal of Thermophysics*. – 2022. – V. 43. – №. 2. – P. 1–10.

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов. Все отзывы положительные. В отзывах отмечено, что исследование является законченным и выполнено на высоком научном уровне, тема работы является актуальной, полученные результаты обладают научной новизной и способствуют пониманию процесса термоакустики и теплоотдачи от поверхностей с графеновым покрытием.

В отзыве на автореферат к.т.н. Новотельновой А.В., доцента образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», содержится одно замечание: «Вместе с тем следует указать на определённые недостатки работы, которые могут служить также пожеланиями для перспективных исследований автора. Используемый автором метод позволяет получать графеновые плёнки от 1 нм до нескольких микрон в зависимости от длительности осаждения, концентрации метана и температуры подложки. Толщина покрытия, в свою очередь, влияет на концентрацию дефектов границ зерен и на электро- и теплофизические свойства покрытия. В этой связи желательно было подробнее осветить вопрос об использованных автором методах оценки толщины покрытий. Остался за кадром и вопрос о влиянии технологических факторов получения покрытия на термоакустический эффект».

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Конобеевой Н.Н., профессора кафедры информационных систем и компьютерного моделирования ФГАОУ ВО «Волгоградский государственный университет» содержится три замечания:

1. В работе не представлено пояснение, каким образом определялась однородность покрытия графена, выращенного на медных цилиндрах.
2. Автор не приводит аргументы в пользу выбора частотного диапазона, при котором проводилось исследование термоакустического эффекта.
3. В работе отсутствуют данные о ресурсе плёнок графена в качестве активного элемента в термоакустических преобразователях.

В отзыве на автореферат к.ф.-м.н. Небогатиковой Н.А., старшего научного сотрудника ИФП СО РАН содержится пять замечаний:

1. П.3 в разделе «Научная новизна» - не указано численно либо экспериментально было исследовано влияние неравномерного прогрева кристаллов графена на формирование звукового поля.

2. П.1 в разделе «Основные положения, выносимые на защиту» неудачно использован термин «композит» для описания созданных и исследованных в работе структур.

3. На рисунке 3 показана визуализация течения воздуха с подтверждением наличия ламинарного режима естественной конвекции для медного цилиндра длиной ~ 3 см при $T\ 425^{\circ}\text{C}$. Однако не приведено сравнение режима с медными цилиндрами без покрытия графеном и не приведена информация о характере режима конвекции для них.

4. В описании содержания главы 3 приведены новые и интересные результаты относительно черноты медных цилиндров различными типами покрытия. Однако не указано, насколько «свежими/старыми» были покрытия из графена и не приведено обсуждения их стабильности в зависимости от времени, в том числе в зависимости от количества монослоев графена в них и их качества.

5. В-целом, в автореферате не представлена информация о качестве выращенных в работе покрытий, количестве слоев в них и размере доменов. Также из текста автореферата не ясно, как именно осуществлялся перенос либо рост пленок на поверхности медных цилиндров и как это можно реализовать на других металлах.

В отзыве на автореферат к.т.н. Павлова М.В., доцента кафедры теплогазоводоснабжения Вологодского государственного университета, содержится два замечания:

1. Методика оценки теплового воздействия на степень черноты металлических образцов требует уточнения: отсутствует описание контрольных экспериментов и анализа стабильности графенового покрытия в условиях циклического температурного нагружения, что ограничивает достоверность сделанных выводов о его защитных свойствах.

2. Согласно ГОСТ Р 7.0.11-2011, в заключении диссертационной работы, помимо итогов выполненного исследования и рекомендаций, также должны быть приведены перспективы дальнейшей разработки темы.

В отзыве на автореферат к.ф.-м.н. Сафаргалиева Р.Ф., доцента кафедры физики и приборостроения ФГБОУ ВО Тюменского индустриального университета, содержится два замечания:

1. При создании устройств на основе двумерных наноматериалов важным параметром являются свойства контактного интерфейса, который в некоторых случаях может определять конечные свойства функционального элемента. Из автореферата не

ясно, исследовались ли автором различные способы формирования контактов и как они влияют на свойства получаемых устройств.

2. В четвертой главе при теоретическом анализе распределения температуры внутри кристалла графена авторы полагают, что размер графенового кристалла определяется размером зерна меди, в то время как поликристаллическая пленка растет из зародышей, концентрация которых зависит от параметров синтеза, а не от размера кристаллических зерен меди. Таким образом, из автореферата не понятно, является ли графеновое покрытие на единичном медном зерне монокристаллическим.

В отзыве на автореферат к.т.н. Макарова П.Г., доцента кафедры низких температур НИУ «МЭИ», содержится три замечания:

1. В автореферате в качестве одного из положений, выносимых на защиту, упоминается методика нанесения графеновых покрытий, однако само развёрнутое описание технологических параметров процесса не было приведено. Вероятно, следует его искать в полном тексте диссертации.

2. В разделе, посвящённом термоакустическим эффектам, полезным было бы привести сравнение полученных данных с существующими теоретическими моделями или результатами других авторов — это усилило бы интерпретационную часть исследования.

3. Присутствуют незначительные опечатки.

В отзыве на автореферат д.ф.-м.н. Стрижака П.А., заведующего лабораторией тепломассопереноса Национального Томского политехнического университета, содержится три замечания:

1. В первом разделе автореферата целесообразно перечислить лидирующие коллективы в области исследований и сформулировать нерешенные в полной мере задачи.

2. При представлении количественных результатов не обсуждены причины рассогласований данных для серии экспериментов. Объект исследований крайне интересен. Измерения далеко нетривиальные. Интересен анализ вопроса рассева данных измерений в сериях.

3. При исследовании эффекта термоакустики важно рассмотреть разные по составу и свойствам газовые среды. Этот вопрос необходимо проработать для определения границ применимости результатов исследований.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их высокой квалификацией в областях науки, непосредственно связанных с темой диссертации. Ведущая организация является одним из лидеров в области исследования процессов тепломассопереноса, в ней работают специалисты, которые могут дать полноценную экспертную оценку научной и практической значимости результатов работы. Официальные оппоненты д.т.н. Хвесюк В.И. и д.ф.-м.н. Пономарёв А.Н.,

являются признанными специалистами в области теплофизики и фотоакустики, что подтверждается наличием у них публикаций ряда научных работ в данной области исследований, в том числе соответствующих тематике диссертационного исследования соискателя, и опубликованных в рецензируемых научных изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований была разработана и отработана методика синтеза графенового покрытия на массивных медных образцах цилиндрической формы и методика переноса на полимерные и стеклянные подложки. Впервые исследовано влияние графенового покрытия на степень черноты медной поверхности. Химическая инертность и газонепроницаемость графенового покрытия предотвращает диффузию кислорода к поверхности металла и последующий процесс окисления в воздушной среде при температурах до 260 °С. Показано, что графеновое покрытие позволяет полностью предотвратить окисление поверхности меди до 260 °С, что приводит к сохранению коэффициента черноты поверхности, соответствующего чистой меди ($\varepsilon = 0.05$). Показано, что графеновое покрытие снижает мощность радиационных потерь в 6 раз при температуре 290 °С. Впервые экспериментально показано, что звуковое излучение обусловлено термоакустическим эффектом, а не механическими колебаниями. Впервые установлено, что неоднородность акустического поля заметна лишь на масштабах порядка размера кристаллов графена (в данной работе, 50 — 200 мкм).

Теоретическая значимость работы обоснована тем, что, используя теоретическую модель и учитывая особенности поликристаллической структуры графенового покрытия, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), выполнена оценка влияния на акустическое поле, формируемое при термоакустическом эффекте, неравномерного тепловыделения в пределах отдельных кристаллитов графена. Таким образом, получены принципиально новые данные об акустическом эффекте при пропускании тока в графеновых композитах. Впервые исследовано влияние графенового покрытия на степень черноты металлических поверхностей. Выполнен анализ неравномерного нагрева кристаллов графена и его влияния на теплофизические и акустические процессы. Получены новые данные о свойствах поликристаллических графеновых плёнок, позволяющие разрабатывать методы управления теплофизическими и акустическими характеристиками таких материалов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что полученные результаты могут быть использованы для оптимизации технологии синтеза графеновых покрытий, что важно для создания функциональных композитов и устройств. Разработанная методика синтеза графеновых плёнок на массивных металлических образцах позволяет повысить качество покрытия и адаптировать его для применения в различных промышленных условиях. Изучение

защитных свойств графена, препятствующего окислению поверхности металлов, открывает перспективы применения этого материала в условиях повышенной коррозионной активности, например, в энергетике, авиации и химической промышленности. Возможность сохранения низкой степени черноты поверхности металлических объектов благодаря графеновым покрытиям позволяет снижать энергетические потери при лучистом теплообмене, что имеет значение для разработки энергоэффективных технологий. Результаты исследования термоакустического эффекта в графеновых композитах демонстрируют их перспективность в создании термофонов и других акустических устройств с однородной амплитудно-частотной характеристикой. Благодаря отсутствию механически подвижных элементов такие устройства имеют потенциал для применения в компактных системах звукогенерации, медицинских устройствах и акустических сенсорах. Представленные в диссертационной работе результаты могут найти применение в научных и образовательных учреждениях, выполняющих исследования по данной теме, таких как Институт космических исследований РАН, Объединённый институт высоких температур РАН, Институт общей физики им. А. М. Прохорова и других научных организациях, проводящих исследования в области теплофизики.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что результаты, полученные с использованием современных методов измерений, являются обоснованными, и выполнены в рамках калибровок с определением неопределённостей измерений, проведено сопоставление полученных результатов автора диссертации с теоретическими и экспериментальными данными других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии в проектировании, изготовлении и запуске экспериментальных установок, проведении экспериментальных исследований, обработке и анализе данных, интерпретации полученных результатов, а также подготовке докладов для научных конференций и публикации статей в рецензируемых журналах. Результаты, представленные в диссертации и выносимые на защиту, были получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка задач исследования и выбор методики измерений проведены соискателем совместно с научным руководителем д.ф.-м.н. Смовжем Д.В.

Диссертационным советом 24.1.129.01 сделан вывод о том, что диссертация Бойко Евгения Викторовича представляет собой научно-квалификационную работу, в которой решена комплексная научная задача экспериментального исследования влияния поликристаллического графена на процесс теплоотдачи в окружающую среду и формирования звукового поля при термоакустическом эффекте у поверхности графенового покрытия, имеющая существенное значение для развития теплофизики микро- и наносистем. Представленная диссертационная работа соответствует критериям

п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013.

На заседании 04 июня 2025 года диссертационный совет 24.1.129.01 принял решение присудить Бойко Евгению Викторовичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 10 докторов наук по профилю специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали за присуждение ученой степени – 21, против – 0, недействительных бюллетеней – 1.

04 июня 2025 года

Председатель
диссертационного совета
академик РАН



С.В. Алексеенко

Ученый секретарь
диссертационного совета
профессор РАН

В.В. Терехов