

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Бойко Евгения Викторовича
на тему «**Термоакустика графеновых покрытий и влияние графенового
покрытия на теплоотдачу**», представленную на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук по специальности **1.3.14** – Теплофизика
и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы исследования

Работа посвящена исследованию теплофизических и акустических свойств поликристаллического графена, полученного методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ). Основное внимание уделено изучению влияния графенового покрытия на конвективную и радиационную теплоотдачу, а также на формирование звукового поля при термоакустическом эффекте. Рассматриваются перспективы применения графена в качестве защитного покрытия для металлов и функционального элемента в термоакустических устройствах. Графен с низкой тепловой инерцией идеально подходит для термофонов — устройств, преобразующих тепло в звук без подвижных частей, что обеспечивает однородную амплитудно-частотную характеристику (1 Гц – 20 МГц). Графен, получаемый методом химического осаждения из газовой фазы (ХОГФ), позволяет контролировать толщину и площадь покрытия, однако его поликристаллическая структура вызывает неравномерное тепловыделение, влияющее на акустическое поле. Существующие модели термоакустического излучения требуют учёта этих особенностей. Графен препятствует окислению металлов благодаря газонепроницаемости, снижая тепловые потери и контролируя степень черноты поверхности. Это открывает перспективы промышленного применения, но использование графена ограничено из-за дефектов его структуры. Вопросы теплообмена в таких системах остаются малоизученными. Таким образом, в данной работе внимание сосредоточено на исследовании влияния поликристаллического ХОГФ графена на конвективную и радиационную теплоотдачу в окружающую среду, а также исследовании формируемого звукового поля при термоакустическом эффекте в композитах на основе графена.

Целями настоящей работы являются:

1. Разработка технологии нанесения графенового покрытия на поверхности различных материалов и различной геометрии;
2. Исследование термоакустики графеновых композитов;
3. Исследование эффективности графенового покрытия в управлении теплоотдачей в окружающую среду в режимах радиационно-конвективного теплообмена.

Задачи диссертационной работы:

1. Разработать метод создания металлических, полимерных и стеклянных композитов на основе поликристаллической графеновой пленки, полученной методом химического осаждения из газовой фазы.
2. Исследовать влияние неравномерного нагрева поверхности поликристаллического графена на интенсивность создаваемого звука в условиях термоакустики.
3. Исследовать процессы лучисто-конвективной теплоотдачи в окружающую среду нагретых медных цилиндров с графеновым покрытием, включая определение степени черноты поверхности образцов.

Оценка содержания диссертации

Структура диссертации построена по общепринятой схеме. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 101 страницу печатного текста, включая 50 рисунков, 4 таблицы и библиографический список из 92 наименований.

Во **введении** даётся краткое описание актуальности использования графена в качестве защитного покрытия, эффекта термоакустики, его ключевых особенностей. Сформулирована цель работы и её задачи. Представлены основные положения, выносимые на защиту и краткое описание диссертации по главам.

В **первой главе** проведён литературный обзор по теме работы. Описаны защитные свойства графена, использование его в качестве нагревательных элементов, а также описано развитие исследований в области термоакустики, основные экспериментальные достижения и ряд теоретических моделей, созданных для описания термоакустического эффекта.

Во **второй главе** описывается способ выращивания графенового покрытия, а также методы характеристики образцов. Для синтеза графена использовался метод химического осаждения из газовой фазы. Рост графена происходил на медной каталитической подложке в атмосфере метана при температуре 1075 °С. Анализ структуры слоёв производился с помощью метода спектроскопии комбинационного рассеяния света. Кристаллографическая структура медной подложки определялась с помощью метода дифракции отражённых электронов (EBSD). Также описан разработанный способ переноса графенового покрытия на полимерные и стеклянные подложки.

В **третьей главе** представлены результаты исследований лучисто-конвективной теплоотдачи в окружающую среду от медных цилиндров с чистой поверхностью и поверхностью, покрытой поликристаллической графеновой плёнкой. 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. Данная методика защиты поверхностей может применяться и для других металлов или их сплавов. Для улучшения защитных свойств необходимо развивать технологию синтеза монокристаллического покрытия, а также технологию его переноса на произвольные поверхности. Графеновое покрытие может быть использовано для снижения потерь тепла от нагретых поверхностей. Например, показано, что графеновое покрытие снижает мощность радиационных потерь с медной поверхности в 6 раз при температуре 290 °С.

В **четвертой главе** представлен анализ теоретических моделей термоакустического эффекта. Рассмотрен процесс возбуждения термоакустического излучения при помощи переменного электрического тока. Показано, частота излучения будет удвоенной по сравнению с частотой возбуждающего электрического сигнала. При использовании напряжения смещения, частоты будут совпадать. Проведён анализ распределения температуры на поверхности проводника при прохождении электрического тока. Рассмотрена теоретическая модель Дашевского. Основные положения данной теории заключаются в том, что всё выделяющееся джоулево тепло распределяется между плёнкой, подложкой и атмосферой пропорционально их теплоёмкостям прогретых слоёв. Теплоёмкость слоя вычисляется, как произведение толщины, площади, плотности и удельной теплоёмкости. Данная теплоёмкость зависит от глубины теплового проникновения. Также была выведена формула для расчёта звукового давления, создаваемого точечным источником, которая затем была расширена на случай протяжённого источника. Произведён расчёт коэффициента полезного действия для термоакустического преобразователя. Рассмотрены особенности температурного распределения в пределах отдельно взятого кристалла графена и его влияние на термоакустические характеристики образцов.

В **пятой главе** представлено прямое экспериментальное доказательство термоакустического эффекта. Результаты исследований, выполненных с использованием атомно-силовой микроскопии (АСМ), показали, что амплитуда механических колебаний термоакустического преобразователя не превышает 161 нм при уровне звукового давления 65 дБ на расстоянии 2 см и частоте 3 кГц. Механические колебания с такой амплитудой при указанной частоте не могут обеспечить наблюдаемый уровень звукового давления. Это свидетельствует о том, что механические осцилляции не вносят значительного вклада в формирование звукового поля, создаваемого термоакустическим преобразователем на основе композита графен-стекло. Следовательно, основным механизмом генерации звука в

исследуемой системе является термоакустический эффект, а не механические колебания подложки. Впервые установлено, что неравномерность прогрева и размер кристаллитов CVD-графена влияют на процесс генерации звука только на масштабах, сопоставимых с размером кристаллитов графена, и при условиях, типичных для использования графеновых термофонов, не оказывают решающего влияния на термоакустический эффект. Проведена апробация термоакустической модели и описаны результаты расчёта звукового поля вблизи поверхности графенового покрытия с учётом неравномерности полей температуры.

В заключении приведены основные результаты работы.

Основная научная новизна диссертационного исследования и полученных результатов заключается в следующем: 1) Развита и отработана методика синтеза графенового покрытия на металлических образцах и переноса на полимерные и стеклянные образцы. 2) Исследован термоакустический эффект в графен-полимерных и графен-стеклянных композитах. Впервые экспериментально изучен вклад механических колебаний поверхности композитов при генерации звука. 3) Впервые исследовано влияние неравномерного прогрева кристаллов графена на формирование звукового поля вблизи поверхности термоакустического преобразователя. 4) Исследованы защитные свойства графена для предотвращения окисления поверхности металла на основе нового технологического решения, использующего открытый в двадцать первом веке принципиально новый материал. Исследовано изменение степени черноты медно-графеновых композитов с ростом температуры, в результате чего получены результаты, которые невозможно было предсказать в смысле обеспечения высокой эффективности снижения радиационных потерь (в 6 раз!). Классический метод с помощью экранирования лучистых потоков слишком сложен, чтобы обеспечить такую высокую интенсивность. Проведено исследование влияния графенового покрытия на процессы лучистой и конвективной теплоотдачи от металлических цилиндров в окружающую газовую среду.

Теоретическая и практическая значимость работы

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. Речь, видимо, идёт о

создании принципиально новой технологии. 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.

Таким образом, проведённое исследование углубляет понимание физических процессов в графеновых покрытиях и композитах, а также расширяет их прикладные возможности в теплофизических и акустических приложениях.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивалась использованием современных методик измерений, анализом погрешностей измерений, воспроизводимостью полученных данных и их сравнением с опубликованными результатами других исследований.

Тема диссертационной работы **соответствует указанной научной специальности 1.3.14 — «Теплофизика и теоретическая теплотехника»** для физико-математических наук. Содержание работы соответствует паспорту специальности по п. 1 «Фундаментальные, теоретические и экспериментальные исследования молекулярных и макросвойств веществ в твёрдом, жидком и газообразном состоянии для более глубокого понимания явлений, протекающих при тепловых процессах и агрегатных изменениях в физических системах».

Считаю, что цель и все поставленные в работе задачи решены в полном объёме и на высоком научном уровне. Работа широко апробирована. Содержание работы полностью представлено в имеющихся публикациях. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Думаю, что в успехе этой работы большая доля руководителя - Смовж Дмитрия Владимировича.

Естественно, при знакомстве с работой возникают вопросы. В частности, нигде нет объяснения, почему в качестве материала выбрана именно медь. Это - просто удобство, или есть какие-то другие, более важные причины.

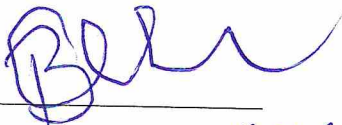
В работе упоминается, что были попытки использовать не цилиндрические образцы, а плоские. Но о результатах ничего не сказано. Было бы интересно сравнить качество покрытия графеном цилиндрических и плоских образцов.

Возможно, я неправ, но на меня странное впечатление произвёл коэффициент полезного действия термоакустического преобразователя $10^{-6} - 10^{-4}$.

Считаю, что автор настоящей диссертационной работы Бойко Евгений Викторович заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент:

Хвесьюк Владимир Иванович


подпись 17.04.2025

Доктор технических наук, профессор

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Профессор кафедры теплофизики МГТУ им. Баумана

khvesyuk@bmstu.ru

Тел.: +7 (499) 265 79 05

Федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования

«Московский государственный технический университет

имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Адрес: 105005, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный,
ул. 2-я Бауманская, д. 5, с. 1,

Тел.: +7 (499) 263 63 91,

<https://bmstu.ru/>

E-mail: bauman@bmstu.ru

Я, Хвесьюк Владимир Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Бойко Евгения Викторовича, и их дальнейшую обработку.



ВЕРНО

СПЕЦИАЛИСТ ПО ПЕРСОНАЛУ

КАДРОВое
АДМИНИСТРИРОВАНИЕ

БАШИРОВА ОЛЕСЯ СЕРГЕЕВНА

65-07