

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.

Работа посвящена комплексному изучению поликристаллического графена, синтезированного химическим осаждением из газовой фазы, с акцентом на его тепловые и акустические характеристики. В частности, исследуется влияние графеновых покрытий на процессы конвективной и лучистой теплоотдачи, а также исследуется процесс генерации звукового поля у поверхности графена при термоакустическом эффекте. Отдельное внимание уделено возможностям использования графена в качестве антикоррозионного барьера на металлических деталях и как активного элемента в термоакустических преобразователях. Благодаря чрезвычайно низкой тепловой инерции графен отлично подходит для создания термофонов — устройств, преобразующих тепловые колебания в акустические без механических компонентов, с равномерной амплитудно-частотной характеристикой в диапазоне до 20 МГц. Технология химического осаждения из газовой фазы позволяет точно контролировать толщину и площадь покрытия графена, однако поликристаллическая структура материала ведёт к неравномерному распределению теплового потока, что влияет на однородность звукового поля. Для корректного моделирования термоакустического излучения необходимо учитывать эти микроструктурные особенности. Кроме того, непроницаемость графена для газов обеспечивает надёжную защиту металлических поверхностей от окисления, что даёт возможность сохранять исходную степень черноты поверхности и, тем самым, снижает тепловые потери на излучение. Тем не менее, детали теплообмена в системах с графеновыми слоями пока не до конца ясны и требуют дальнейших экспериментальных и теоретических исследований.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

Развита и отработана методика синтеза графенового покрытия на металлических образцах и переноса на полимерные и стеклянные образцы;

Исследован термоакустический эффект в графен-полимерных и графен-стеклянных композитах. Впервые экспериментально изучен вклад механических колебаний поверхности композитов при генерации звука;

Впервые исследовано влияние неравномерного прогрева кристаллов графена на формирование звукового поля вблизи поверхности термоакустического преобразователя;

Исследованы защитные свойства графена для предотвращения окисления поверхности металла. Исследовано изменение степени черноты медно-графеновых композитов с ростом температуры. Проведено исследование влияния графенового покрытия на процессы лучистой и конвективной теплоотдачи от металлических цилиндров в окружающую газовую среду.

Научная и практическая значимость.

В рамках данного исследования полученные данные помогут усовершенствовать методы синтеза графеновых покрытий, что важно для создания новых композиционных материалов и приборов на их основе. Показано, что графен эффективно защищает металлические поверхности от окисления, что расширяет его применение в условиях повышенной коррозионной активности — от энергетических установок до авиационной и химической отраслей. Кроме того, низкая излучательная способность покрытых графеном металлов снижает тепловые потери при радиационном теплообмене, что особенно ценно для промышленных систем с высокими требованиями к энергоэффективности. Результаты исследования термоакустического эффекта в композитах на основе графена демонстрируют их потенциал для создания термофонов с однородной амплитудно-частотной характеристикой. Благодаря отсутствию

механически подвижных компонентов, такие устройства могут найти применение в компактных системах звукогенерации, медицинских аппаратах и акустических датчиках.

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

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 автор приводит аргументацию актуальности исследования, фокусируясь на потенциале графена как защитного материала и фундаментальных аспектах термоакустического явления. Здесь четко обозначены цели исследования, перечислены решаемые научные задачи, сформулированы положения, выносимые на защиту, а также приведена логическая структура работы с краткими аннотациями глав.

Первая глава представляет систематизированный анализ существующих исследований. Особое внимание уделено барьерным характеристикам графенового покрытия, его применению в нагревательных системах. Обзор также охватывает как экспериментальные результаты, так и теоретические разработки в области термоакустики, включая современные подходы к моделированию изучаемого явления.

Экспериментальная часть работы, изложенная во второй главе, посвящена описанию технологии синтеза графеновых структур методом химического осаждения из газовой фазы. Для анализа структуры полученных покрытий применялись метод спектроскопии комбинационного рассеяния света и метод дифракции отраженных электронов. Приведено описание методике переноса графеновых слоев на полимерные и стеклянные подложки.

Третья глава демонстрирует сравнительный анализ теплоотдачи в окружающую среду медных образцов с графеновым покрытием и без него. Изучено влияние графенового покрытия на коэффициент черноты медной поверхности. Установлено, что графеновое покрытие полностью предотвращает изменение степени черноты меди при нагреве до 260°C. Показано шестикратное снижение радиационных теплопотерь при температуре медной поверхности в 290°C. Подчеркнута важность разработки методов синтеза монокристаллических графеновых покрытий для повышения эффективности защитного покрытия.

В четвертой главе выполнено критическое рассмотрение термоакустических моделей с акцентом на механизмы генерации акустических волн. Детально рассмотрена модель Дашевского, связывающая выделение джоулева тепла с теплоемкостными характеристиками слоев. Особое внимание уделено пространственной неоднородности температурных полей в графеновых кристаллитах и их влиянию на акустическое поле, формируемое у поверхности термофона.

Заключительная глава содержит прямое экспериментальное подтверждение доминирующей роли термоакустического механизма в генерации звука. Путем анализа поверхности атомно-силовой микроскопией было определено, что амплитуда механических колебаний подложки составляет менее 161 нм при уровне звукового давления 65 дБ (3 кГц, расстояние 2 см), что недостаточно для объяснения наблюдаемой акустической интенсивности. Установлено, что геометрия кристаллитов графена оказывает незначительное влияние на формируемое акустическое поле на масштабах, превышающих их характерную протяженность.

В заключении приведены основные результаты работы.

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.

К содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

1. В таблице 1.1 указана плотность воздуха, при нормальных условиях равная 1.1764 кг/м^3 . Это значение отличается на 40-50% в меньшую сторону от стандартных.
2. На странице 21 значение толщины графена указано равным 0,34 нм, что не является корректным параметром для однослойного материала, толщиной в 1 атом углерода.
3. Дублирование формулы удельной теплоемкости (1.1), она же (1.3).
4. Отсутствие пояснения, что за частоты электрического сигнала f_1 и f_2 в формуле (1.4).
5. В пояснении к формулам (1.7) и (1.8) указана частота f , которой нет в формулах, но нет пояснений по параметрам e_{gas} и e_{sub} . Вероятно, это коэффициенты тепловой инерции газа и подложки, соответственно?
6. По рисунку 3.2 нет объяснения о смещении D-пика КР-спектра поверхности образца после синтеза относительно исходного.
7. В формуле 4.42 неверно прописана степень экспоненциального выражения – пропущена скорость звука c в числителе.
8. В работе отсутствуют SEM снимки синтезированных графеновых структур. Присутствие таких снимков улучшило бы понимание дефектности структуры полученного графена.

Высказанные замечания не изменяют общую положительную оценку диссертации. Считаю, что цель и все поставленные в работе задачи решены в полном объеме и на высоком научном уровне. Работа широко апробирована. Содержание работы полностью представлено в имеющихся публикациях. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Тема диссертационной работы соответствует указанной научной специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника для физико-математических наук. Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и рекомендуется к защите на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

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:

Заведующий лабораторией молекулярного имиджинга и фотоакустики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук (634003, г. Томск, проспект Академический 2/4; (3822) 49-18-81; root@ispms.ru; http://www.ispms.ru), доктор физико-математических наук (1.3.8. Физика конденсированного состояния)



Пономарев Александр Николаевич

13 мая 2025 г.

Подпись Пономарева Александра Николаевича заверяю:
Ученый секретарь ИФПМ СО РАН,
канд. физ.-мат. наук



Матолыгина Наталья Юрьевна