

ФЕДЕРАЛЬНОЕ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК



125412, Москва
ул. Ижорская, 13, стр. 2
Телефон: (495) 485-83-45
Факс: (495) 485-99-22



ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Бойко Евгения Викторовича
«Термоакустика графеновых покрытий и влияние графенового покрытия на теплоотдачу»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы

Первая информация о графене появилась в 2004 году, когда удалось исследовать слой углерода атомарной толщины, полученный последовательным расслоением кристалла графита. Графен обладает хорошей теплопроводностью, гибкостью, упругостью, прозрачностью, прочностью, способностью хорошо проводить электрический ток. Графен химически нейтрален при нормальных условиях, его окисление начинается при температуре выше 400°C. Такой набор свойств и их сочетаний определил широкий спектр возможного применения данного материала.

Объектом исследования в диссертационной работе является пленка поликристаллического графена, полученная методом химического осаждения из газовой фазы на медной фольге и перенесенная на стеклянное и полимерное покрытия, в теплофизических и акустических системах.

В связи с высоким спросом на электронные устройства возрастает и спрос на рассеивание тепла в них. Новые решения требуют не только высокой теплопроводности тонкопленочного материала, но и определенной его толщины для увеличения продольного

потока теплопроводности. В виде наполнителя графен легче образует теплопроводящую сетку, чем гранулированные наполнители, а это позволяет его использовать в теплопроводящих композитах и покрытиях.

Графен является идеальным материалом в устройствах, преобразующих тепло в звук без механических элементов. Наиболее простым способом повышения мощности акустических колебаний является повышение температуры. Чем больше теплопроводность пленки, тем менее инерционен термоакустический преобразователь на ее основе. Такие излучатели могут быть использованы в области мультимедиа, бытовой электроники, биологии, медицины.

Диссертационная работа Бойко Е.В., направленная на исследование влияния поликристаллического графена на конвективную и радиационную теплоотдачу в окружающую среду и формирование звукового поля при термоакустическом эффекте в композитах на его основе, является актуальной научной задачей с высоким прикладным потенциалом.

Общая характеристики работы

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 обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, представлены положения, выносимые на защиту. Кратко отмечены новизна и практическая значимость результатов, полученных в ходе исследования.

В первой главе обсуждается современное состояние исследований в области применения графена в качестве защитного покрытия и термоакустики. Особое внимание уделено основным экспериментальным достижениям и теоретическим моделям, созданным для описания термоакустического эффекта.

Во второй главе приведены условия получения графеновой пленки при химическом осаждении из газовой фазы с последующим переносом на полимерные и стеклянные подложки. Описаны методы характеристики полученных структур.

В третьей главе представлены результаты исследований лучисто-конвективной теплоотдачи в окружающую среду от медных цилиндров с чистой поверхностью и поверхностью, покрытой поликристаллической графеновой плёнкой. Показана возможность использования графеновых покрытий в качестве защитных для медных поверхностей.

Четвертая глава посвящена анализу теоретических моделей термоакустического эффекта. Описаны особенности генерации термоакустического излучения, термоакустическая модель Дашевского и проведен расчёт КПД термоакустического

преобразователя с учетом особенностей распределения температуры и градиентов температуры в кристаллах графена.

В главе пять приведены результаты исследования механических колебаний поверхности термоакустических преобразователей, оценен вклад в общую интенсивность формируемого звука, проведена апробация термоакустической модели и описаны результаты расчета звукового поля вблизи поверхности графенового покрытия с учетом неравномерности полей температуры.

В заключении сформулированы основные выводы и результаты диссертационной работы. Список цитируемой литературы содержит источники, удовлетворяющие всем вопросам диссертационной работы.

Материалы диссертации изложены в 5 научных статьях в периодических изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК. Получено 4 патента РФ. Апробированы на 10 конференциях.

Содержание автореферата отражает основные положения диссертации.

Научная новизна работы заключается в получении новых экспериментальных данных об условиях формирования графенового покрытия и его свойствах. В числе основных результатов можно выделить следующие:

1. Развита методика синтеза графенового покрытия на металлических поверхностях и его переноса на полимерные и стеклянные.
2. Исследован термоакустический эффект в системах графен-полимер и графен-стекло. Впервые экспериментально изучен вклад механических колебаний поверхности данных систем при генерации звука.
3. Впервые исследовано влияние неравномерного нагрева кристаллов графена на формирование звукового поля вблизи поверхности термоакустического преобразователя.
4. Исследовано влияние графенового покрытия на процессы лучистой и конвективной теплоотдачи от металлической поверхности в форме цилиндра в окружающую газовую среду.

Научная значимость работы диссертационной работы

На основе теоретической модели Дащевского выполнена оценка влияния на акустическое поле, формируемое при термоакустическом эффекте, неравномерного тепловыделения для отдельных кристаллитов поликристаллической структуры графенового покрытия. Получены новые данные об акустическом эффекте при резистивном нагреве композиций из графеновых пленок на закаленном стекле и полимере (ПЭТ/ЭВА).

Впервые исследовано влияние графенового покрытия на степень черноты медной поверхности. 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

Практическая ценность.

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, 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.

Достоверность результатов обеспечивалась использованием современных методик измерений, анализом погрешностей измерений, воспроизводимостью полученных данных и их сравнением с опубликованными результатами других исследований.

Общие замечания и недостатки

1. В литературном обзоре уделяется значительное внимание применению углеродных нанотрубок в термофонах, в то время как в диссертационной работе они не используются. С какой целью автор привел описание усовершенствования эффективности термофонов на основе УНТ? Что касается применения графена в термофонах, то вместо описания дается просто ссылка [37].

2. В выводах по главе 1 автор обобщает, что благодаря предотвращению процессов окисления становится возможным контроль степени черноты металла, что позволяет контролировать энергетические потери при лучистом теплообмене. Иными словами, достаточно металлическую поверхность закрыть антикоррозионным покрытием и “становиться возможным контроль степени черноты металла”?

3. Автор в работе применяет понятие композит для сэндвича из CVD-графена и жаропрочного закаленного стекла и CVD-графена и полимеров (ПЭТ/ЭВА). Однако композитом считается материал из двух или более компонентов с существенно различными физическими и/или химическими свойствами, которые в сочетании приводят к появлению нового материала с характеристиками, отличными от характеристик отдельных компонентов и не являющимися простой их суперпозицией. В составе композита принято выделять матрицу/матрицы и наполнитель/наполнители, последние выполняют функцию армирования. Полученные структуры не относятся к композитам или композитным материалам, в них нет матрицы. Это композиционный материал. Аналог – фанера.

4. Итогом аттестации графена на медных цилиндрах (высота $L=2.9$ см, диаметр $d=1$ см) с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния света на КР-спектрометре Т64000, является то, что сформированное покрытие является многослойным. Однако графен состоит из кристаллитов и, очевидно, что число слоев в каждом домене будет различным. Какой параметр для пленки площадью $16,4 \text{ см}^2$ должен отвечать за ее качество при использовании в качестве защитной? Какая площадь поверхности пленки была оценена КРС методом?

5. При выполнении исследований с графеном в качестве металлической подложки использовалась медь, других металлов в экспериментах не применялось. Автор делает обобщение для металлических поверхностей в целом.

Заключение по диссертации о соответствии ее требованиям

Тема диссертации Бойко Е.В. важна и актуальна. Работу следует отнести к научной специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

В рамках диссертационной работы 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 теплопотерь. В работе представлено решение ряда актуальных задач, которые могут использоваться для дальнейшего развития теоретических моделей.

Результаты работы целесообразно использовать в Институте космических исследований РАН, Объединенном институте высоких температур РАН, Институте общей физики им А.М. Прохорова и других научных организациях, проводящих исследования в области теплофизики.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации. Личный вклад Бойко Е.В. не вызывает сомнений.

Все перечисленные замечания носят рекомендательный характер и не снижают общей значимости диссертационной работы.

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» №842 от 24 сентября 2013 года (ред.18.03.2023г.), а ее автор, Бойко Евгений Викторович, заслуживает присуждение ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Доклад соискателя был заслушан и одобрен на семинаре ОИВТ РАН под руководством академика О.Ф. Петрова. «23» октября 2024 г. Протокол № 19 от 23 октября 2024 г. Решением семинара было поручено подготовить отзыв на представленную работу ведущему научному сотруднику лаборатории 2.3, д.ф.-м.н. М.Б. Шавелкиной.

Отзыв составлен, М.Б. Шавелкиной (Место работы: Объединенный институт высоких температур Российской академии наук. Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, тел. +7(495) 485-97-77, e-mail: mshavelkina@gmail.com. Адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, тел. +7(495) 485-97-77, e-mail: mshavelkina@gmail.com).

В.н.с., доктор физ.-мат. наук

Шавелкина М.Б.

Подпись М.Б. Шавелкиной заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН,

доктор физ.-мат. наук



Киверин А. Д.