

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.01
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук
по диссертации
НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК
аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 26.06.2025 № 9

О присуждении Трофимуку Андрею Дмитриевичу
гражданину Российской Федерации,
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Формирование и структурные свойства двухкомпонентных систем «детонационный наноалмаз-оксид графена»» по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния» принята к защите 25 апреля 2025 г., протокол № 6, диссертационным советом ФТИ 34.01.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26. Состав диссертационного совета утвержден в количестве 18 человек приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе от № 5 от 19.01.2021, № 13 от 21.01.2022 и № 15 от 26.01.2024 об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.01 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов

Соискатель Трофимук Андрей Дмитриевич, 31 августа 1995 года рождения в 2019 году с отличием окончил программу магистратуры федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) по направлению подготовки – 04.04.01 «Химия».

В 2023 году окончил аспирантуру ФТИ им. А.Ф. Иоффе, в процессе обучения сданы кандидатские экзамены по физике конденсированного

состояния, истории и философии науки, иностранному языку (английскому).

В период подготовки диссертации и в настоящее время работает в лаборатории физики кластерных структур ФТИ им. А.Ф. Иоффе в должности младшего научного сотрудника.

Диссертация выполнена в ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Научный руководитель:

Ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией физики кластерных структур ФТИ им. А. Ф. Иоффе к.ф.-м.н. Дидейкин Артур Ториевич.

Оппоненты:

Долматов Валерий Юрьевич, доктор технических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории В.Ю. Долматова, ФГУП «Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог» предоставил положительный отзыв на диссертацию, содержащий 2 замечания.

Кумзеров Юрий Александрович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заместитель руководителя Отделения физики диэлектриков и полупроводников, ФТИ им. А.Ф. Иоффе предоставил положительный отзыв на диссертацию содержащий 3 замечания.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 5 замечаний.

Отзыв подготовил доктор физико-математических наук профессор, заведующий кафедрой микро- наноматериалов федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический

университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» Липовский Андрей Александрович.

Отзыв утвердил проректор по науке федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук», доктор физико-математических наук, Мухин Иван Сергеевич.

Диссертационная работа обсуждена на научном семинаре Центра нанотехнологий федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук».

В заключении отзыва сказано:

Диссертационная работа А.Д. Трофимука выполнена на высоком научном уровне и является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научном уровне. Полученные в работе результаты и выводы являются достоверными и обоснованными. Автореферат диссертации и публикации автора в высокорейтинговых научных изданиях полностью отражают научную новизну и содержание работы. Приведенные в работе научные результаты позволяют квалифицировать их как существенные для современной физики конденсированного состояния. Работа имеет большое практическое значение.

Тематика выполненных А.Д. Трофимуким исследований соответствует паспорту специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния, а диссертационная работа А.Д. Трофимука по форме и содержанию соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе

Российской академии наук и установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением №842 Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации Трофимук Андрей Дмитриевич заслуживает присуждения ему искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что они имеют ученые степени доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются известными специалистами и обладают высоким уровнем компетентности в научной области, в которой выполнена диссертационная работа, что подтверждается их публикациями в рецензируемых научных журналах.

Выбор ведущей организации обосновывается тем, что федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж.И. Алферова Российской академии наук» ведет активные исследования в области физики конденсированного состояния, в частности в области физики и технологии наногетероструктур и наночастиц. В Университете действует диссертационный совет по физике конденсированного состояния.

Основное содержание диссертации представлено в 5 работах, опубликованных в журналах, соответствующих требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

1. Trofimuk A.D., Sharonova L.V., Kidalov S.V., Shvidchenko A.V., Kirilenko D.A., Stovpiaga E.Yu. and Dideikin A.T. Extrastrong aggregates of detonation

nanodiamonds: structure and formation. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2024, 32(11), 1050–1061.

2. Trofimuk A.D.; Kirilenko D.A.; Kukushkina Yu.A.; Tomkovich M.V.; Stovpiaga E.Yu.; Kidalov S.V.; Dideikin A.T. Structure and properties of self-assembled graphene oxide–detonation nanodiamond composites. Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures, 2024, Volume 32, Issue 9, Pages 887-895.

3. Рабчинский М.К.; Трофимук А.Д.; Швидченко А.В.; Байдакова М.В.; Павлов С.И.; Кириленко Д.А.; Кульвелис Ю.В.; Гудков М.В.; Шиянова К.А.; Коваль В.С.; Петерс Г.С.; Лебедев В.Т.; Мельников В.П.; Дидейкин А.Т.; Брунков П.Н. Влияние знака дзета-потенциала наноалмазных частиц на морфологию композитов «графен-детонационный наноалмаз» в виде суспензий и аэрогелей. ЖТФ, т.92, 12, 2022, с. 1853 – 1868

4. Kulvelis Y.V.; Rabchinskii M.K.; Dideikin A.T.; Trofimuk A.D.; Shvidchenko A.V.; Kirilenko D.A.; Gudkov M.V.; Kuklin A.I. Small-Angle Neutron Scattering Study of Graphene-Nanodiamond Composites for Biosensor and Electronic Applications. J. Surf. Invest. X-ray, v.15, 5, 2021, p. 896 – 898.

5. Trofimuk A.D.; Muravijova D.V.; Kirilenko D.A.; Shvidchenko A.V. Effective method for obtaining the hydrosols of detonation nanodiamond with particle size < 4 nm. Materials, v.11, 8, 2018, ArtNo: #1285.

На автореферат поступило 11 отзывов.

1. Отзыв заведующего лабораторией аналитических методов исследования вещества Института физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН, профессора, доктора технических наук Чурилова Григория Николаевича положительный замечаний не содержит.

2. Отзыв профессора Физического факультета, кафедры электроники твердого тела Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» доктора физико-математических наук Усачева Дмитрия Юрьевича положительный содержит 2 замечания:

□ В обосновании актуальности работы говорится о стремлении получить высокое значение удельной поверхности исследуемого материала, но не сказано для чего. Это затрудняет понимание мотивации работы.

□ Местами имеются некорректные формулировки, например «методом МУРР показано, что аэрогели, получаемые из ОГ без добавления ДНА, деформируются», хотя автор, вероятно, имеет в виду деформацию листов графена. Имеются противоречия, например, «образцы ... высушивали на воздухе (130 °С), и затем полученные образцы термообработывали на воздухе. Показано, что после удаления воды и термообработки в вакууме ... сохраняется пористая структура...».

3. Отзыв начальника сектора, Лаборатории нейтронной физики, Международной межправительственной организации «Объединенный институт ядерных исследований» (ЛНФ ОИЯИ), доктора физико-математических наук, Авдеева Михаила Васильевича положительный, замечаний не содержит.

4. Отзыв старшего научного сотрудника Лаборатории химии координационных полиядерных соединений Института общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН, кандидата химических наук Фоминой Ирины Георгиевны положительный, содержит 6 замечаний:

□ Стр. 4 «...о влиянии (или отсутствии влияния) ультразвука не структуру ОГ,...» вместо «на структуру ОГ».

□ стр. 13 «...При добавлении к ОГ противоположно заряженных в водной среде частиц ДНА(Z+) рефлекс от ОГ становится...» вместо «...Для образцов ОГ с добавлением ДНА(Z+) рефлекс...».

□ на стр. 11, 13, 14, 16 использована аббревиатура ОГ, которая не расшифрована в тексте автореферата.

□ стр. 14 «... образцы термообработывали на воздухе...» вместо «...образцы подвергали термообработке...»,

□ стр.14. «... наиболее явно выражены разделенные полосы в 2500-3000 см⁻¹ (2D- and D+G- полосы).» вместо ««... наиболее явно выражены разделенные полосы в области 2500-3000 см⁻¹ ...»

□ стр. 16 «...КР-спектры систем, полученных из ОГ и деагрегированного ДНА(Z+) [A-2]. Справа - аналогичный рисунок на диапазоне 2500-3200 см⁻¹, отмечены....» вместо «...Слева- КР-спектры систем, полученных из ОГ и деагрегированного ДНА(Z+) [A-2] в диапазоне 1000-3000 см⁻¹. Справа - КР-спектры систем, полученных из ОГ и деагрегированного ДНА(Z+) [A-2] в диапазоне 2500-3200 см⁻¹» и др.

Кроме этого, в списке Публикаций автора по теме диссертации отсутствуют тезисы докладов в сборниках конференций.

5. Отзыв профессора Лаборатории синтеза и нанотехнологий лекарственных веществ отдела нейрофармакологии ФГБНУ «Институт экспериментальной медицины», доктора биологических наук Пиотровского Левона Борисовича положительный, содержит 1 замечание:

□ К сожалению, в работе не приведено детальное описание пористой структуры. В ряде работ было показано, что форма пор и кривизна каналов пористых наноматериалов напрямую влияют на клеточный ответ. Получение более подробной информации о пористости получаемых структур было бы полезно для решения ряда биологических задач.

6. Отзыв старшего научного сотрудника лаборатории Физики взрыва, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН, кандидата физико-математических наук Кашкарова Алексея Олеговича положительный, содержит 3 замечания:

□ В разделе «актуальность работы» дана ссылка [12] с указанием, что авторы использовали ДНА размерами около 30 нм. И действительно, в этой работе в таблице приведены размеры

используемых ДНА 31 ± 6 нм, но на приведенных там пяти изображениях, полученных с помощью ПЭМВР, такие крупные частицы не продемонстрированы, за исключением, может быть, одного наноалмаза размером около 20 нм. Скорее всего реальные характерные размеры ДНА в работе [12] не так сильно отличаются от используемых Трофимуком А. Д.

□ В диссертации в главе 3 на стр. 54 приведен следующий текст: «Также отметим, что во всех дифрактограммах образцов, содержащих ДНА (как ДНА(Z+), так и ДНА(Z-)), максимум наиболее интенсивного рефлекса, соответствующего отражению от плоскостей алмазной решётки (111), смещён с $2\theta = 43.9^\circ$ на $2\theta \approx 43.6^\circ$. Скорее всего эта особенность объясняется суперпозицией рефлекса от плоскости (111) ДНА и рефлекса (10) графена.» И далее «Одновременно с этим левое плечо рефлекса (111) остаётся уширенным, что говорит о значительном вкладе рефлекса (10) графена.» Однако в главе 6 на рис. 21 (стр. 79) для образца исходного «деагломерированного» (авторская редакция) алмаза рефлекс (111) имеет схожую форму, его максимум смещен влево и левое плечо уширено. Возможно, обсуждаемый вклад рефлекса (10) графена и не такой значительный.

□ Далее, также в тексте диссертации, на стр. 78 в главе 6 обсуждается изменение удельного электрического сопротивления ДНА после выдержки в вакууме при температуре 1400°C . Если автор имел техническую возможность измерения удельного электрического сопротивления образцов ДНА, то непонятно, почему аналогичные измерения не были проведены (в тексте диссертации нет информации об этом) для образцов ДНА – ОГ. При заявленном возможном применении полученных композитов для изготовления устройств накопления электрической энергии, удельное электрическое сопротивление ДНА – ОГ представляется достаточно значимой характеристикой.

7. Отзыв главного научного сотрудника Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, доктора химических наук Чумаковой Натальи Анатольевны положительный, содержит 1 вопрос и 2 замечания:

- На рисунке 8 показан результат деконволюции рефлекса (111) порошковых дифрактограмм для двух образцов. Каждый рефлекс представлен в виде суммы трех линий Лоренца с единым центром. Какова точность такой деконволюции?
- На рисунке 6 отсутствуют результаты атомно-силовой микроскопии, указанные в подписи к рисунку.
- Ошибка в обозначении рисунков (справа – слева) в подписи к рисунку 7.

8. Отзыв доцента, ведущего научного сотрудника Лаборатории биоорганических структур Института кристаллографии им. А.В. Шубникова Курчатовского комплекса кристаллографии и фотоники Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», доктора химических наук Букреевой Татьяны Владимировны положительный, содержит 1 замечание:

- В качестве замечания можно указать на отсутствие в автореферате информации об устойчивости во времени структуры разработанных двухкомпонентных систем.

9. Отзыв заведующего сектором ФГУП «Научно-исследовательский институт синтетического каучука имени академика С.В. Лебедева», доктора химических наук Возняковского Александра Петровича положительный, содержит 5 замечаний:

- Текст автореферата должен содержать необходимый минимум информации для понимания результатов выполненного исследования и научных результатах, представленных в диссертации. Автор же грешит общими фразами типа «Приведены методики ...», «Подробно описаны...», «Образцы исследованы...» Без ознакомления с полным

текстом диссертации сложно понять важность и необходимость этих исследований.

□ Основное содержание диссертации посвящено получению изолированных листов оксида графена. Хотелось бы понять для какой области практического применения предназначены полученные материалы. Или перспективы их использования в практике научных исследований.

□ При формулировании целей задачи автор использует термины «исследовать, изучить, разработать подходы...». Эти термины не подразумевают получение конкретного результата. Задачи работы должны быть сформулированы четко. Определить такие-то параметры. Получить частицы ДНА с размером...

□ Из текста автореферата непонятно определялось ли число слоев в исходном ОГ. Имеется ли различие по полидисперсности частиц для исходного и модифицированного ОГ. Если листы ОГ удалось изолировать, то это должно быть подтверждено соответствующим экспериментом.

□ При описании методики выделения «наименьшей фракции» (Глава 6) полезно указать массу осажденных крупных частиц.

10. Отзыв ведущего научного сотрудника лаборатории физики взрыва, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН, доктора физико-математических наук Сатонкиной Натальи Петровны положительный, содержит 8 замечаний:

□ Ссылка 12, статья вышла на год раньше, чем указано в автореферате.

□ Стр. 4 вторая строка снизу «... о влиянии (или отсутствии влияния) ультразвука не структуру ОГ, а также о равномерности распределения ДНА.»

□ Стр. 5 » детонационный наноалмаз-оксид графена».

□ Аббревиатура ДНА с расшифровкой упоминается несколько раз (стр. 3, 5, 7, 9, 15, 20), то есть мало используется по прямому назначению. То же самое относится к аббревиатуре ОГ.

□ Рис. 1, присутствует обозначение ГО, которое не расшифровано, при использовании публикации автора А-3 удалось выяснить, что так обозначено введенное ранее в автореферате ГО. Причем на одном рисунке присутствуют оба обозначения.

□ Стр. 9 в первом предложении сверху пропущено подлежащее.

□ Литература недооформлена.

□ Стр. 18 рис. 7 справа, один график гладкий, три не сглажены, в чем причина такого отличия?

11. Отзыв заведующего лабораторией алмазной электроники, доктора физико-математических наук Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук» (ИПФ РАН) Вихарева Анатолия Леонтьевича положительный, замечаний не содержит.

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по отработке технологии создания углеродных систем из разноименно заряженных наноразмерных частиц детонационных наноалмазов (ДНА) и протяженных двумерных частиц оксида графена (ОГ) и исследованию структурных особенностей и физических свойств формирующихся систем были получены следующие основные результаты:

1. Показано, что при взаимодействии в водной среде ДНА(Z^+) и ОГ формируются структуры, размер которых кратно больше, чем размер листа ОГ. При этом частицы ДНА(Z^+) оказываются распределены на листах оксида графена практически однородно, а сами листы оксида графена оказываются пространственно разнесены. Показано, что после удаления воды и термообработки без доступа окислителя листы восстановленного

оксида графена остаются разделёнными частицами термообработанного ДНА.

2. Установлено, что взаимная компенсация зарядов частиц ДНА(Z+) и листов ОГ в водной среде достигается при отношении масс компонентов 3.5 (в пересчёте на сухое вещество), причём частицами ДНА покрывается примерно 50 % поверхности листа ОГ. При таком отношении масс компонентов 3.5 максимально возможная удельная площадь поверхности двухкомпонентной системы не превосходит 470 м²/г.

3. Показано, что при формировании аэрогелей из смесей ОГ и ДНА(Z+) листы ОГ деформируются и скручиваются. При этом листы ОГ даже в скрученном виде остаются пространственно разделёнными частицами ДНА.

4. Показано, что при соотношении масс компонентов, соответствующему точке электронейтральности смеси, возможно получить трёхмерную пористую sp²-углеродную структуру, в которой свободно подвешенные листы

восстановленного ОГ разделены частицами термически обработанного наноалмаза.

5. Предложены два подхода, позволяющие изменять медианный размер кристаллитов детонационных наноалмазов (ДНА): выделение наименьшей фракции из суспензии и прямое уменьшение размеров посредством двухэтапной обработки. Предложена модель строения формирующихся в процессе детонационного синтеза агрегатов наноалмазных частиц, объясняющая устойчивость таких частиц к разработанным ранее процессам деагрегации.

Все научные результаты являются новыми и имеют фундаментальную и практическую значимость. Фундаментальная значимость заключается, в частности, в обширной информации о строении двухкомпонентных структур наноалмаз-графен, полученной на основе комбинации методов изучения структурных, химических, электрических и оптических свойств.

Предложенный метод получения систем ДНА-ОГ и детальное изучение их свойств имеют практическую значимость для создания многослойных структур с разделёнными листами графена для двумерной электроники.

Высокая степень достоверности результатов обеспечивается использованием современных методик исследования; тем, что работа является логичным продолжением исследований свойств ДНА, проводимых в научной группе, к которой принадлежит соискатель; их непротиворечием современным представлениям из физики и технологии наночастиц. Обоснованность сформулированных выводов и положений основывается на последовательном подходе к получению и детальной характеристике систем ДНА-ОГ.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1 Процесс самоорганизации двухкомпонентных наноструктур «детонационный наноалмаз-оксид графена» в водной среде происходит за счет кулоновского притяжения отрицательно заряженных частиц оксида графена (ОГ) и положительно заряженных частиц гидрированного детонационного наноалмаза (ДНА).

2 Максимальное значение удельной поверхности двухкомпонентного материала из детонационного наноалмаза (ДНА) и оксида графена (ОГ) достигается при однородном распределении частиц ДНА по поверхности ОГ.

3 Термообработка в вакууме двухкомпонентной структуры «детонационный наноалмаз-оксид графена» не влияет на величину удельной поверхности, определяемую массовым соотношением компонентов.

4 Алмазные наночастицы, формируемые в процессе детонационного синтеза, образуют как минимум два типа агрегатов, отличающихся друг от друга площадью контакта между первичными кристаллитами.

Все эксперименты, описанные в диссертации, выполнены лично автором или при его непосредственном участии.

Вклад автора также состоит в формулировке и постановке задач, разработке экспериментальных методов, получении образцов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке докладов и публикаций по материалам диссертации.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 12 человек, из них 11 докторов наук по специальности 1.3.8 - «физика конденсированного состояния», участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 12, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

На заседании 26 июня 2025 года диссертационный совет принял решение присудить Трофимуку Андрею Дмитриевичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Председатель

диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Ю.Г. Кусраев

Ученый секретарь

диссертационного совета

PhD

А.М. Калашникова

26 июня 2025 г.