

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.03  
на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук  
по диссертации

НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 20 июня 2024 г. № 4

О присуждении Михайлову Владиславу Сергеевичу,  
гражданину Российской Федерации,  
ученой степени кандидата физико-математических наук

Диссертация «Моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора» по специальности 1.3.5 – «физическая электроника» принята к защите 11 февраля 2024 г., протокол № 2, диссертационным советом ФТИ 34.01.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул. д.26. Диссертационный совет утвержден приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75, прил. 1 от 12 июля 2019 г., приказами Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 223 от 18.12.2023 г., № 177 от 11.10.2023 г., № 28 от 16.02.2023 г., № 41 от 25.02.2022 г., № 13 от 09.02.2021 г. об изменении состава диссертационного совета ФТИ 34.01.03 и приказом Директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 160 от 21.12.2021 г. о внесении изменений в шифры специальностей диссертационных советов.

Соискатель Михайлов Владислав Сергеевич, 7 октября 1994 года рождения, в 2017 году окончил магистратуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению подготовки 03.04.02 - «физика». В 2021 году окончил аспирантуру Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по направлению 03.06.01 - «Физика и астрономия». Кандидатские экзамены успешно сданы соискателем в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» в 2021 году. Кандидатский экзамен по специальности 1.3.5 – «физическая электроника» успешно сдан соискателем в Федеральном государственном

бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук в 2023 г. В настоящее время соискатель работает в должности младшего научного сотрудника лаборатории атомных столкновений в твердых телах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории атомных столкновений в твердых телах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный руководитель – Зиновьев Александр Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией атомных столкновений в твердых телах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Научный консультант – Шергин Андрей Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории атомных столкновений в твердых телах Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

1. Борисов Анатолий Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского авиационного института (национального исследовательского университета), дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания.

2. Карасёв Платон Александрович, доктор физико-математических наук, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», дал положительный отзыв на диссертацию, содержащий 8 замечаний.

Ведущая организация: Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» предоставила положительный отзыв на диссертацию, содержащий 4 замечания. Отзыв составил зав. лабораторией ЛИПН ОФАЯ НИИЯФ МГУ, кандидат физико-математических наук Шемухин Андрей

Александрович. Отзыв подписали заведующий ОФАЯ НИИЯФ МГУ, доктор физико-математических наук, профессор Чеченин Николай Гаврилович и директор НИИЯФ МГУ, член-корреспондент РАН, профессор Боос Эдуард Эрнстович. Отзыв утверждён доктором физико-математических наук, проректором МГУ им. М.В. Ломоносова, профессором РАН Федяниным Андреем Анатольевичем. В заключении отзыва указано, что диссертационная работа Михайлова В.С. является законченной, логически выстроенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную и важную тему, и отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а её автор Михайлов В.С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Выбор официальных оппонентов обосновывается тем, что оба имеют ученую степень доктора наук, работают в различных организациях, не имеют других ограничений, накладываемых п. 3.7 действующего Положения о присуждении ученых степеней. Выбранные оппоненты являются широко 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 образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» в своем составе имеет Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына. НИИЯФ МГУ является известным научно-учебным центром международного уровня, в котором ведутся теоретические и экспериментальные исследования по актуальным проблемам атомной физики: физика взаимодействий ускоренных частиц с веществом; взаимодействие ионов с поверхностью и наноструктурами; ориентационные и релятивистские эффекты, потери энергии, изменение зарядового состояния частиц; модификация и анализ приповерхностных слоев ионными и электронными пучками.

Кроме того, в Федеральном государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» действуют диссертационные советы по физико-математическим специальностям.

Основное содержание диссертации представлено в 8 работах, индексируемых в базе данных Web of Science:

1. Бабенко П.Ю., Михайлов В.С., Зиновьев А.Н. Коэффициенты распыления бериллия изотопами водорода // Письма в журнал технической физики. — 2023. — Т. 49, № 8. — С. 42.
2. Бабенко П.Ю., Михайлов В.С., Шергин А.П., Зиновьев А.Н. Моделирование распыления поликристаллического бериллия атомами H, D, T // Журнал технической физики. — 2023. — Т. 93, № 5. — С. 709.
3. Михайлов В.С., Бабенко П.Ю., Шергин А.П., Зиновьев А.Н. Влияние выбора поверхностного барьера на расчет коэффициентов распыления вольфрама изотопами водорода // ЖЭТФ. — 2023. — Т. 164, № 3. — С. 478.
4. Михайлов В.С., Бабенко П.Ю., Зиновьев А.Н. Коэффициенты распыления вольфрама легкими примесям // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2024. — Т. 18, № 3. — С. 321.
5. Михайлов В.С., Бабенко П.Ю., Шергин А.П., Зиновьев А.Н. Коэффициенты распыления бериллия и вольфрама различными атомами от водорода до вольфрама // Физика плазмы. — 2024. — Т. 50, № 1. — С. 12.
6. Михайлов В.С., Бабенко П.Ю., Тенсин Д.С., Зиновьев А.Н. Энергетические спектры атомов водорода, отраженных от поверхности вольфрама // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2023. — № 2. — С. 95—101.
7. Михайлов В.С., Бабенко П.Ю., Шергин А.П., Зиновьев А.Н. Коэффициенты отражения частиц при бомбардировке бериллия и вольфрама различными атомами // Журнал технической физики. — 2023. — Ноябрь. — Т. 93, № 11. — С. 1533.
8. P.Yu. Babenko, M.I. Mironov, V.S. Mikhailov, A.N. Zinoviev Evaluation of Be fluxes into the ITER tokamak plasma due to sputtering of the first wall by D and T atoms leaving the plasma // Plasma Phys. Controlled Fusion. — 2020. — March. — V. 62, № 4. — p. 045020.

На автореферат поступило 3 отзыва.

1. Отзыв доктора физико-математических наук, доцента, ведущего научного сотрудника лаборатории «Диагностика микро- и наноструктур» Ярославского филиала Физико-технологического института им. К.А. Валиева Российской Академии Наук (ЯФ ФТИАН им. К.А. Валиева РАН) Бачурина Владимира Ивановича, положительный, содержит 3 замечания:

- В автореферате отсутствует информация о структуре диссертации – объем, количество ссылок на цитируемую литературу.

- Более корректно говорить о диагностике и модификации поверхности твердого тела, а не твердого тела (с.3).

- Можно было ограничиться более коротким списком цитируемой литературы в автореферате.

2. Отзыв доктора физико-математических наук, доцента Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Физического факультета, кафедры физической электроники Гайнуллина Ивана Камильевича, положительный, содержит 1 замечание:

- В некоторых местах не хватает строгости в терминологии. Так же следует отметить, что в защищаемых положениях и выводах не приводятся количественные оценки.

3. Отзыв доктора физико-математических наук, ведущего научного сотрудника Научно-исследовательского физико-технического института федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского» Тетельбаума Давида Исааковича, положительный, содержит 2 замечания:

- Комментируя данные, приведенные на рис.7, автор делает вывод о «неплохом» согласии с экспериментом. Для достаточно высоких энергий это вывод, судя по рисунку, действительно справедлив, но при низких энергиях наблюдаются отклонения не только по абсолютным значениям, но и по виду энергетической зависимости спектров отражения. Это фактор автором не комментируется и не объясняется, хотя бы на качественном уровне.

- На легендах к рис. 4 и 6 указаны цифровые обозначения (после фамилий авторов работ). Следовало либо расшифровать эти обозначения, либо в подписях к рисункам привести соответствующие номера ссылок из «Списка литературы».

Диссертационный совет отмечает, что в рамках выполненных соискателем работ по диссертации «Моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора» были получены следующие основные результаты:

1. Посчитаны коэффициенты распыления вольфрама и бериллия с использованием многочастичного DFT потенциала для широкого диапазона энергий налетающих частиц от порога распыления до 100 кэВ.

2. Изучено влияние тормозных потерь на расчет коэффициентов распыления. Введена поправка на многократное рассеяние частиц в твердом теле, что позволяет значительно повысить точность вычислений коэффициентов распыления.
3. Рассмотрены предельные случаи поверхностного потенциального барьера, что позволяет оценить изменение коэффициента распыления при различной шероховатости поверхности. Продемонстрировано сильное влияние поверхностного потенциала на результат расчета коэффициентов распыления, особенно для области энергий вблизи порога распыления.
4. Проанализировано влияние поверхностного потенциала на угловые и энергетические характеристики распыленных частиц. Рассчитаны для двух типов поверхностного потенциала средние энергии распыленных частиц в зависимости от энергии налетающих ионов.
5. С использованием полученных в работе коэффициентов распыления и зависимостей от угла падения и энергии бомбардирующих частиц, оценены потоки распыленных частиц первой стенки токамака при бомбардировке быстрыми нейтральными атомами дейтерия и трития, покидающими плазму.

Практическая значимость работы заключается в выборе рассматриваемых материалов мишени: вольфрам и бериллий, которые особенно интересны как обращенные к плазме потенциальные материалы первой стенки термоядерных реакторов. Посчитанные коэффициенты распыления и отражения для случаев бомбардировки вольфрама и бериллия изотопами водорода, а также атомами характерных примесей в реакторе, могут быть использованы для совершенствования имеющихся моделей и кодов моделирования плазменных разрядов токамаков. Отдельный интерес представляют полученные данные по характеристикам распыленных частиц. Энергетические и угловые спектры позволяют спрогнозировать динамику дальнейшего поведения распыленных частиц, что позволяет более точно описывать влияние примесей на разряд. Знание энергетических спектров отраженных частиц позволяет точнее проводить расчет баланса топлива в плазме токамака, а также обеспечивает повышение точности работы приборов корпускулярной диагностики ионной компоненты плазмы.

Достоверность результатов обеспечивается тем, что в процессе моделирования использовались самые современные и актуальные данные по взаимодействию ионов с твердым телом. Используемые потенциалы взаимодействия были получены методом теории функционала плотности. Также учитывались современные представления о неупругих тормозных способностях на электронах. Результаты моделирования в диссертационной работе сопоставлялись с имеющимися

экспериментальными данными, а также с результатами моделирования, полученными другими коллективами.

Актуальность полученных результатов обоснована тем, что глубокое понимание процессов распыления и рассеяния является необходимым условием на пути к управляемому термоядерному синтезу (УТС). Уже сейчас понятно, что одной из основных проблем в успешной реализации проекта является взаимодействие высокоэнергетических потоков плазмы с элементами реактора. Чрезвычайно интенсивные потоки быстрых атомов, ионов, нейтронов и электронов бомбардируют стенку токамака и дивертор. Это может приводить к разрушению реактора, а также к поступлению в объем реактора нежелательных примесей, которые способны сделать достижение термоядерной реакции с положительным выходом невозможным.

Полученные результаты позволили соискателю сформулировать и защитить следующие положения:

1. Повышение точности расчета коэффициентов распыления и рассеяния при бомбардировке твердых мишеней пучками атомов или ионов благодаря использованию DFT потенциалов с ямой для конкретных систем с уточнением параметров потенциальной ямы из спектроскопических данных. Введение поправки на электронное торможение путем учета отклонения длины траектории от проективного пробега.

2. Значения коэффициентов распыления, их угловые и энергетические зависимости при бомбардировке поликристаллического бериллия и вольфрама изотопами водорода и ионами примесей в плазме токамак-реактора. Случаи идеально гладкой мишени и мишени, состоящей из острий. Энергетические и угловые спектры распыленных частиц.

3. Оценка потока распыленного материала при облучении стенки токамака ИТЭР из вольфрама и бериллия быстрыми нейтральными атомами, покидающими плазму.

4. Значения коэффициентов отражения при бомбардировке поликристаллических вольфрама и бериллия различными атомами, от H до W. Влияние на значения коэффициентов отражения применяемых моделей электронных тормозных способностей, поверхностного потенциала и структуры мишени. Энергетические спектры и угловые зависимости отраженных частиц на примере систем H, D-W.

Все представленные в диссертации результаты получены непосредственно автором или при его активном участии, что указано в Заключении семинара лаборатории атомных столкновений в твердых телах ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Автором был усовершенствован имеющийся численный код для моделирования рассеяния частиц. Новая версия кода

позволяет моделировать процесс распыления, учитывает каскадные эффекты, а также позволяет отслеживать параметры распыленных частиц. Автором был проведен ряд описанных в диссертации численных экспериментов с последующей обработкой полученных данных. Обсуждение и интерпретация полученных результатов проводилась совместно с научным руководителем и соавторами публикаций.

Основные результаты проведенного диссертационного исследования представлены на следующих международных конференциях: 29th international conference on atomic collisions in solids & 11th international symposium on swift heavy ions in matter (Helsinki, Finland, 2022); XXV/XXVI Международная конференция «Взаимодействие ионов с поверхностью» (Россия, Ярославль, 2021/2023); 52-я/51-я/50-я Тулиновская конференция по Физике Взаимодействия Заряженных Частиц с Кристаллами (Россия, Москва, 2023/2022/2021), а также в ряде всероссийских конференций: Всероссийская конференция и школа молодых ученых и специалистов VIII «Физические и Физико–Химические Основы Ионной Имплантации» (Россия, Казань, 2022); XXVII конференция «Взаимодействие Плазмы с Поверхностью» (Россия, Москва, 2024); Недели Науки ФизМех (Россия, Санкт-Петербург, 2023).

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве \_\_ человек, из них \_\_ докторов по специальности 1.3.5 – «физическая электроника», участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали за – 20, против – 0, воздержался – 1.

На заседании 20 июня 2024 года диссертационный совет принял решение присудить Михайлову В.С. ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – «физическая электроника».

Зам. председателя диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук

Ф.В. Чернышев

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физ.-мат. наук

И.А. Горбунова

20 июня 2024 г.