

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

Московского государственного  
университета имени М. В. Ломоносова

р. А.А. Федянин

2024 г.

## О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию Михайлова Владислава Сергеевича «Моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

### *Актуальность темы диссертации*

Пучки ионов с низкой энергией являются многообещающим инструментом для топографического проектирования поверхностей и инженерии в нано- и микрометровых масштабах. Ионные пучки является одним из эффективных методов, активно используемых для модификация поверхности твердых тел. Ионно-пучковое распыление, т. е. удаление атомов с поверхности из-за воздействия бомбардирующих ионов или атомов, является неотъемлемой частью многочисленных методов обработки поверхности. При этом, глубокое понимание процессов распыления и рассеяния является необходимым условием на пути к управляемому термоядерному синтезу (УТС). На сегодняшний день УТС является самым перспективным возобновляемым, безопасным и экологически чистым источником энергии. Поэтому изучение эволюции поверхности при ионном облучении входит в обширные теоретические и экспериментальные работы, особенно в последнее десятилетие.

Таким образом, моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора представляется актуальной задачей.

### ***Структура и основное содержание работы***

Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 134 страницы, включая 56 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 157 наименований.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, изложена цель и задачи работы, степень разработанности, научная новизна, методология и методы исследования, теоретическая и практическая значимость полученных результатов и положения, выносимые на защиту, представлены апробация работы, публикации и личный вклад соискателя, описаны структура и объём диссертации.

**В первой главе** приведен обзор литературы по теме диссертационной работы. В ней описаны основные физические процессы и изложено современное состояние исследований в области взаимодействия ионов с поверхностью твердых тел.

**Во второй главе** содержится описание программного кода для моделирования взаимодействия атомных пучков с твердым телом.

**В третьей главе** приведены результаты моделирования процессов распыления и рассеяния при ионном облучении вольфрамовых и бериллиевых мишеней. Проведен анализа различных характеристик распыленных и отраженных частиц. Также приведены результаты расчета распыления стенки токамака ИТЭР быстрыми изотопами водорода.

**В заключении** представлены основные выводы по результатам проведенных исследований.

### ***Научная новизна исследования и полученных результатов. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации***

Высокий уровень исследований обеспечил научную новизну полученных результатов, которые сформулированы в автореферате и диссертационной работе. Результаты данной работы опубликованы в 8 специализированных российских и зарубежных журналах, рекомендованных ВАК РФ, и входящих в список журналов Scopus и Web of Science. В качестве наиболее важных из них отметим следующие:

- Посчитаны коэффициенты распыления вольфрама и бериллия с использованием многочастичного DFT потенциала для широкого

диапазона энергий налетающих частиц от порога распыления до 100 кэВ

- 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.
- 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.
- 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.

Сформулированные в диссертации научные положения, выводы и рекомендации являются новыми, обоснованными и достоверными. Результаты диссертационной работы апробированы на многочисленных всероссийских и международных научных конференциях.

### ***Теоретическая значимость диссертационной работы***

Наиболее важный результат, определяющий теоретическую значимость диссертационной работы, заключается в том, что в ней предложен механизм учета шероховатости поверхности через тип используемого в моделировании поверхностного потенциального барьера. Это позволило проанализировать влияние шероховатости облучаемой мишени на значения коэффициентов распыления и отражения, а также на угловые и энергетические спектры распыленных частиц.

Отдельный интерес представляет внесение поправки на многократное рассеяние частиц в твердом теле при определении электронных тормозных способностей. В работе показано, что учет подобной поправки влияет на значения коэффициентов распыления и рассеяния.

### ***Практическая значимость диссертационной работы***

В работе автором было промоделировано облучение бериллиевой и вольфрамовой мишени частицами в зависимости от энергии бомбардирующих частиц. При этом с не плохой точностью определены

коэффициенты распыления и отражения, которые могут быть использованы для совершенствования имеющихся моделей и кодов моделирования плазменных разрядов токамаков, многочисленных методов обработки поверхности и методов пучкового анализа.

Полученные в работе энергетические и угловые спектры дают возможность спрогнозировать динамику поведения распыленных частиц, что позволяет более точно описывать влияние примесей на разряд токамаков. 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.

### ***Соответствие содержания диссертации указанной специальности***

По своим целям, задачам, содержанию, методам проведенных исследований и научной новизне диссертация соответствует п.6. паспорта специальности 1.3.5 **Физическая электроника** (физико-математические науки).

### ***Соответствие автореферата содержанию диссертации***

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертационной работы, ее основные результаты, положения и выводы.

### ***Недостатки в диссертации и автореферате***

1. Оценка коэффициентов распыления, средняя энергия и угловые распределения потенциальных материалов первой стенки произведены без учета температуры мишени, которая существенно возрастает при работе реактора.

2. В своей работе автор приводит сравнение только с результатами моделирования Экштэйна. Однако во введении автор пишет, что существует ряд кодов, таких как T-RBS, TRIDYN, OKSANA, которые выдают более точные результаты по распылению поверхности.

3. При учете влияния различного типа поверхностного барьера следовало более аккуратно в тексте диссертации прописать какими формулами автор пользуется для случая сферического барьера. Не понятно, что он используется для расчетов: плоскостной барьер с более строгими условиями или какие-то новые формулы.

4. Следовало привести в начале работы список используемых сокращений.

Отмеченные недостатки не снижают общей весьма положительной оценки диссертационной работы, в которой предоставлен большой и безусловно важный материал

### Заключение

Диссертационная работа **Михайлов В. С.** «Моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора» является законченной, логически выстроенной научно-квалификационной работой, выполненной на актуальную и важную тему. В рамках решения фундаментальной научной проблемы по взаимодействию ионных пучков с твердым телом, разработаны новые подходы и выдвинуты новые предложения. Сформулированные научные положения, совокупность которых можно считать, как научное достижение, вносят существенный вклад в физику атомных столкновений в твёрдых телах.

«Считаем, что диссертационная работа Михайлов В. С. «Моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора» 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 ее автор Михайлов В. С. заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук».

Диссертация, автореферат диссертации и отзыв обсуждены и одобрены на семинаре «Физика нано, атомных и ядерных систем и их взаимодействия» ОФАЯ НИИЯФ МГУ от 16 мая 2024г.

Отзыв составил

Зав. Лабораторией ЛИПН ОФАЯ НИИЯФ МГУ,


к.ф.-м.н., ученое звание

Шемухин А.А.

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на семинаре «Физика нано, атомных и ядерных систем и их взаимодействия» ОФАЯ НИИЯФ МГУ от 16 мая 2024г.

Заведующий ОФАЯ НИИЯФ МГУ,


д. ф.-м.н., профессор



Чеченин Н.Г.

Директор НИИЯФ МГУ

профессор, член-корреспондент РАН



Боос Э.Э.

Адрес: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, дом 1, строение 2. Точное наименование: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ)

Тел.: +7(495)939-18-18

Факс: +7(495)939-08-96

E-mail: [info@sinp.msu.ru](mailto:info@sinp.msu.ru)

