

## **ОТЗЫВ официального оппонента**

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Мелузовой Дарьи Сергеевны  
на тему: «Моделирование ионного облучения кристаллических и аморфных мишеней, включая материалы первой стенки токамака-реактора» по специальности 01.04.04 – Физическая электроника

Взаимодействие плазмы с поверхностью обращенных к ней материалов термоядерных установок играет ключевую роль в достижении необходимых для протекания термоядерных реакций параметров плазмы. Кандидатными материалами обращенных к плазме элементов токамаков-реакторов и других термоядерных установок являются углерод, бериллий и вольфрам из-за малого коэффициента распыления и высокой температуры плавления. Однако вольфрам обладает большим эффективным зарядом, что может привести к недопустимо высоким радиационным потерям энергии при попадании атомов вольфрама в центральную плазму. Другой проблемой является накопление в стенках термоядерного топлива, гелия и изотопов водорода. Актуальными являются исследования отражения, профилей имплантации и энерговыделения, особенно распыления поверхности при облучении изотопами водорода, атомами гелия и примесей в плазме токамака бериллия, углерода и вольфрама. Диссертация посвящена разработке методов моделирования взаимодействия атомных пучков с твердым телом, позволяющих учитывать особенности строения мишени и современные данные о характере взаимодействия атома с атомами твёрдого тела, а также проведение расчётов основных процессов, имеющих место при ионном облучении кристаллических и аморфных мишеней, включая материалы первой стенки токамака-реактора.

Положения, выносимые в диссертации на защиту, в полной мере обоснованы в диссертации путем анализа в главе 1 современного состояния исследований взаимодействия ионов и атомов с твёрдым телом, вопросов

моделирования процессов взаимодействий в приближении парных столкновений и методами молекулярной динамики, определения параметров ионно-атомных потенциалов из данных по поверхностному рассеянию, выбором и реализацией адекватных методик моделирования взаимодействия атомных пучков с твердотельными мишенями в главе 2, подробным изложением содержания защищаемых положений в главе 3.

Все защищаемые научные положения содержат признаки научной новизны и являются научно и практически значимыми. Впервые получены из анализа имеющихся экспериментальных данных о радужном рассеянии атомов на поверхности различных кристаллов величины потенциалов взаимодействия налетающей частицы с поверхностью, обнаружено сильное влияние ямы в потенциалах взаимодействия налетающая частица-поверхность на процесс отражения атомов и их пробег, обнаружено образования устойчивой пространственной структуры пучка частиц в кристалле, рассчитаны коэффициенты распыления и их угловые зависимости при бомбардировке вольфрама ионами бериллия, предложена ясная физическая модель, объясняющая универсальность зависимости коэффициентов распыления от энергии в припороговой области при бомбардировке вольфрама лёгкими ионами.

Результаты моделирования представляют также практический интерес для пополнения существующих баз данных взаимодействия частиц плазмы со стенками токамаков-реакторов, в частности энерговыделения при облучении углерода, бериллия и вольфрама атомами с энергетическим спектром для токамака ИТЭР, получения распределения пробегов не прибегая к моделированию, являются важными для совершенствования методов моделирования.

Достоверность полученных в работе результатов подтверждается тем, что потенциалы взаимодействия разработаны с использованием теории функционала плотности и сопоставлены с экспериментальными данными, во всех исследованиях проводили сопоставление с независимыми

экспериментальными и расчётными данными. При отсутствии экспериментальных данных проводили предварительное моделирование с хорошо изученным случаем с целью подтверждения корректности используемых методов и параметров.

По диссертации имеются следующие замечания и вопросы.

1. В разделе 2.5 в таблице 1 не указана размерность потенциалов.
2. В разделе 3.1 рассчитанные значения амплитуды тепловых колебаний сравниваются с независимыми измерениями. Почему сравнение проводится для другой ориентации кристалла, тем более, что тепловые колебания на поверхности являются анизотропными и существенно отличаются от объёмных?
3. Не ясно, что означает часто используемое выражение «табличные данные из SRIM», поскольку SRIM позволяет как табулировать тормозную способность и пробег, так и получать их моделированием.
4. В разделе 3.6 говорится про мишень из аморфного вольфрама. Можно ли получаемые данные применять для поликристаллического вольфрама?
5. В разделе 3.6 не указано зарядовое состояние ионов, для которых проводилось моделирование.

Отмеченные недостатки не снижают ценности данной работы. Диссертационная работа представляет собой законченное исследование, достоверность, научная новизна и значимость результатов которого не вызывает сомнения. Основные результаты и положения работы достаточно полно отражены в 13 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых Web of Science, апробированы на восьми международных конференциях. Основные положения диссертации соответствуют специальности 01.04.04 – Физическая электроника. Основные результаты диссертации достаточно полно изложены в автореферате.

## **Выводы**

Диссертация соответствует требованиям п. 2 Положения о присуждении ученых степеней в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН от 19 августа 2019 г. и является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научных задач, имеющих существенное значение для проблем термоядерной энергетики. Считаю, что автор диссертации Мелузова Дарья Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.04 – Физическая электроника.

**Борисов Анатолий Михайлович,**  
официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технологии производства приборов и информационных  
систем управления летательных аппаратов» Федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский авиационный институт (национальный исследовательский  
университет)»

Контактные данные:

тел.: +7(916)337-59-14, e-mail: anatoly\_borisov@mail.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена  
диссертация: 01.04.08 – Физика плазмы, 01.04.01 – Приборы и методы  
экспериментальной физики

Адрес места работы:

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования «Московский авиационный институт (национальный  
исследовательский университет)», кафедра «Технологии производства  
приборов и информационных систем управления летательных аппаратов»

26.04.2021

А.М. Борисов