

**Отзыв официального оппонента
на диссертацию Михайлова Владислава Сергеевича
«МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПЫЛЕНИЯ И РАССЕЯНИЯ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ
БЕРИЛЛИЯ И ВОЛЬФРАМА – ПЕРСПЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ
ТОКАМАКА-РЕАКТОРА»,**

представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Диссертационная работа В.С.Михайлова посвящена поиску путей определения коэффициентов отражения и распыления вольфрама и бериллия при бомбардировке различными ионами, выявлению соответствующих энергетических и угловых спектров распыленных/отраженных частиц в широком диапазоне энергий падающих ионов.

Автор рассматривает процессы взаимодействия ускоренных ионов с мишенями из металлов, предполагаемых для изготовления первой стенки токамака – вольфрама и бериллия. Одним из основных явлений, наблюдаемых при облучении твёрдого тела ускоренными ионами, является распыление, то есть эмиссия атомов мишени под действием бомбардировки. Понимание механизмов происходящих процессов необходимо для разработки моделей разогрева и удержания плазмы и эффективной реализации термоядерного синтеза. В частности необходимо подробное определение таких характеристик, как угловые и энергетические распределения выходящих частиц. В то же время, натурные эксперименты требуют чрезвычайно высоких затрат ресурсов и времени. Поэтому необходимо не только выполнять экспериментальные исследования распыления, но и развивать численные методы для получения корректных результатов моделирования. Таким образом, тема представленного исследования *является актуальной и практически значимой.*

В работе выполнено большое количество расчетов интегральных и дифференциальных параметров распыления вольфрама и бериллия различными типами частиц, потенциально возникающих в плазме токамака. Использован современный многочастичный DFT потенциал. В частности, определены значения пороговых энергий и коэффициенты распыления, угловые распределения количеств и энергий отраженных и распыленных частиц. Выявлено сильное влияние поверхностного потенциала на угловые и энергетические характеристики распыленных частиц. Введена поправка на многократное рассеяние частиц в твердом теле, что позволило повысить точность вычислений коэффициентов распыления. Эти данные помогут учесть вклад примесных частиц для расчетов возможного поступления примесей в плазму реактора. Проведен модельный расчет распыления стенки реактора частицами из плазмы, оценены потоки распыленных частиц первой стенки токамака при бомбардировке быстрыми нейтральными атомами дейтерия и трития, покидающими плазму. Все описанные результаты *получены автором впервые.*

При разработке методики проведения моделирования автор достаточно внимательно рассматривает имеющиеся проблемы, отдельно фокусируясь на критических параметрах, влияющих на результат. Используемые потенциалы взаимодействия получены из первых принципов методом расчета функционала плотности и верифицированы сравнением с экспериментальными данными, при наличии таковых. Также учитывались современные

представления о неупругих тормозных способностях на электронах, имеющие сопоставление с рядом экспериментальных работ. Сравнение результатов диссертации с литературными данными и результатами моделирования, полученными в других научных группах, показывает неплохое согласие в части, где это возможно, что подтверждает *корректность и надежность* сделанных в диссертации выводов.

По прочтении работы считаю, что полученные автором результаты *являются новыми* и расширяют наше представление о процессах, происходящих при бомбардировке металлов различными ионами. Нет сомнений в том, что В.С.Михайлов *лично внес основной вклад* в постановку задач и разработку методики исследования, выполнил большой объем моделирования и проанализировал полученные данные. Накопленный материал улучшает понимание механизмов отражения и распыления, что делает работу *значимой теоретически*. Результаты исследования *являются* также и *практически значимыми*, поскольку открывают возможности для оптимизации режимов работы токамака. *Основные результаты*, описанные в диссертации, *достаточно полно отражены* в 8 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и были представлены на 6 международных и 3 Всероссийских конференциях. Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

В то же время, при прочтении работы у меня возник ряд вопросов и замечаний.

1. Непонятен критерий выбора атома, с которым произойдет следующее столкновение. Согласно тексту диссертации (см. стр.37), происходит отбор наименьшего прицельного параметра из возможных. Почему автор считает, что взаимодействие произойдет именно с этим атомом? Очевидно, что если такой атом окажется достаточно далеко, то налетающий ион может испытать соударение с другим атомом, пусть для него значение прицельного параметра и будет больше.

2. При моделировании взаимодействия с монокристаллической мишенью, даже для легких ионов, в ней возможно образование дефектов. Учитывается ли это обстоятельство в модели? Какое влияние оно оказывает?

3. Непонятно, как должна выглядеть реальная металлическая мишень для того чтобы для каждой вылетающей частицы реализовался сферический поверхностный потенциал.

4. Автор заявляет, что при использовании в моделировании потенциала «с ямой», при малых углах падения потенциал начинает «затягивать» бомбардирующие частицы в объем мишени, вследствие чего при скользящих углах падения пучка резкого спада коэффициента распыления не наблюдается. Следует ли понимать этот результат как то, что авторы отменяют эффект блокировки и радужное рассеяние?

5. Для пары водород-бериллий лучше согласуются с экспериментальными данными результаты расчетов, полученные в модели со сферическим барьером, а для пар протонов и дейтронов с вольфрамом – с плоскостным. Объяснения причин этого явления не приводятся.

6. Реальная поверхность стенки реактора обладает микрокристаллической структурой, в которой на поверхность выходят различные грани зерен. Оказывает ли кристаллографическое направление нормали к поверхности и зернистость поверхности влияние на коэффициент распыления?

7. Очевидно, что при работе реального токамака будет наблюдаться насыщение поверхности атомами из плазмы, такими как изотопы водорода, гелий, прочие примеси. Оказывает ли этот эффект влияние на распыление и как пренебрежение им сказывается на результатах моделирования?

8. Текст работы страдает от большого количества опечаток и жаргонизмов. Местами это приводит к курьезным фразам, например, «В этом диапазоне энергий и углов различные изотопы водорода имеют схожую зависимость», «максимум, который сдвигается при увлечении начальной энергии влево», «модель неупругих тормозных потерь на электронах». Термины «каскадные частицы» и «поправка на вихлявость» не являются общеупотребительными.

В то же время, указанные замечания не снижают общего высокого мнения о представленной работе. В соответствии со сказанным выше считаю, что *диссертация* В.С.Михайлова «Моделирование распыления и рассеяния при ионном облучении бериллия и вольфрама – перспективных материалов первой стенки токамака-реактора» *отвечает 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 Владислав Сергеевич, *достоин присуждения ученой степени* кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.5. – Физическая электроника.

Официальный оппонент

Карасев Платон Александрович
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор высшей инженерно-физической школы
института электроники и телекоммуникаций
федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

Тел. (812) 552 7516;

e-mail: platon.karasov@phs.spb.ru

Подпись _____
УДОСТ
Ведущий специ
по кадрам. _____