

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Бабенко Павла Юрьевича
«ТОРМОЖЕНИЕ, РАССЕЙЯНИЕ И РАСПЫЛЕНИЕ ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ АТОМОВ
КЭВ-ЭНЕРГИЙ С ТВЕРДЫМ ТЕЛОМ»,
представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.5 – Физическая электроника.

Диссертационная работа П.Ю. Бабенко рассматривает процессы, приводящие к торможению при взаимодействии атомных частиц с энергиями менее 100 кэВ с веществом. Пучки ускоренных ионов широко применяются как в качестве инструмента исследований свойств вещества, так и для решения технологических задач, таких как селективное изменение приповерхностных свойств мишеней. Несмотря на то, что взаимодействие ускоренных частиц с веществом изучаются уже не один десяток лет, до сих пор остается много нерешенных проблем. В частности, предсказания имеющихся теорий далеко не всегда удовлетворительно описывают наблюдаемые экспериментальные данные. Улучшение моделей должно позволить существенно улучшить предсказание таких важных процессов, как воздействие потоков частиц из плазмы на свойства реакторных материалов, модификации свойств различных материалов и т.д. Особенный технологический и технический интерес представляет диапазон невысоких (до 100 кэВ) энергий ионов, поскольку именно такие частицы бомбардируют стенки термоядерных реакторов, или могут применяться в полупроводниковых технологиях. Развитию существующих представлений о взаимодействии частиц невысоких энергий с веществом и проведению моделирования основных процессов, имеющих место при ионном облучении, включая материалы первой стенки термоядерного реактора, и посвящена рассматриваемая диссертация. Таким образом, тема представленного исследования *является актуальной и практически значимой.*

Основная часть диссертации состоит из введения, семи глав и заключения и представляет собой законченное исследование. *Первая глава* содержит обзор результатов, полученных другими исследователями. Проводя анализ опубликованных ранее данных, автор описывает имеющиеся экспериментальные данные, рассматривает развитые подходы к теоретическому и численному моделированию взаимодействия ускоренных ионов с веществом. Показывает достоинства и недостатки различных расчетных методов, в частности, подчеркивает, что потенциал взаимодействия при столкновениях атомов в твердом теле может отличаться от потенциала, описывающего столкновения в газовой фазе, теоретические модели не согласуются с экспериментальными данными, проблему выбора потенциала и модели тормозных потерь для корректного описания распыления и ряд связанных белых пятен. Список процитированной литературы достаточно полно отражает существующие публикации по тематике работы и содержит ссылки на 313 источников. В конце обзора автор перечисляет актуальные проблемы, решение которых приводится в последующих главах. Во *второй главе* автор описывает подходы к компьютерному моделированию торможения быстрых частиц в аморфных, поликристаллических и монокристаллических мишенях методами Монте-Карло и молекулярной динамики. В *третьей главе* описаны результаты анализа неупругих потерь энергии на ионизацию и возбуждение электронной подсистемы при атомных столкновениях, выявляет их дополнительные механизмы. Полученные результаты применяются для анализа торможения в веществе, проводимого в *четвертой главе*. *Пятая глава* рассматривает

особенности потерь энергии быстрой частицей в столкновениях с атомами мишени (ядерные потери) в металлах. *Шестая глава* посвящена анализу различных механизмов отражения ионов от поверхности твердых тел. *Седьмая глава* рассматривает распыление при столкновениях атомов с твердым телом.

Описанные в работе результаты, в частности, скейлинги, для расчета сечения образования автоионизационных состояний и потерь энергии при столкновениях частиц; значительное различие потенциалов, описывающих радужное рассеяние, от традиционных моделей, применяемых для описания атомных столкновений в газовой фазе; дополнительный пик в зависимости сечения ядерных тормозных потерь от энергии соударения, связанный с рассеянием на потенциальной яме коэффициенты отражения и распыления при соударениях изотопов водорода, гелия и ионов примесей с мишенями из Вe и W *получены автором впервые*.

Сравнение получаемых автором результатов с литературными данными показывает неплохое согласие в части, где это возможно, что подтверждает их *корректность и надежность*. На основании изложенного считаю правильным заключить, что аргументация подхода к исследованиям, анализ полученных данных вполне удовлетворительны, а сделанные *выводы обоснованы и достоверны*. Полученные автором результаты *являются новыми* и расширяют наше представление о процессах, происходящих в твердых мишенях при их бомбардировке ускоренными ионами. Нет сомнений в том, что П.Ю. Бабенко *лично выполнил* постановку задач и разработку методики исследования, разработал и руководил разработкой расчетных программных кодов, провел моделирование и анализ полученных данных. Накопленный материал вносит существенный вклад в понимание механизмов взаимодействия ионов с веществом, предложенные модели углубляют понимание процессов торможения ионов, что делает работу *значимой теоретически*. Результаты исследования *являются* также и *практически значимыми*, поскольку открывают возможности для более детального описания взаимодействия ускоренных ионов с объемом и поверхностью мишеней, и, в частности, воздействия плазмы на материалы первой стенки и дивертора термоядерного реактора. *Основные результаты*, описанные в диссертации, *отражены* в 50 статьях, опубликованных в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, и были представлены на различных международных конференциях, в том числе и в качестве приглашенных докладов. Автореферат вполне корректно отражает содержание диссертации.

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

1. При описании электронных тормозных способностей автор рассматривает различные процессы в электронных подсистемах налетающей частицы и частицы-мишени. Но остаётся вопросом, какова дальнейшая судьба ионизованной частицы? Известно, что заряд быстрой частицы в твердом теле зависит от ее скорости, причем в рассматриваемом диапазоне энергий он близок к нулю. Учитывает-ли описываемый подход нейтрализацию?
2. Описание подхода к моделированию методом молекулярной динамики приведено чрезвычайно скупо. В частности, было бы полезно подробнее описать постановку задачи и применяемые в расчете многочастичные потенциалы, поскольку их выбор существенно сказывается на получаемом в расчетах выходе распыления, количестве смещенных атомов и т.д.

3. Не вполне понятно, почему средняя длина траектории частицы в мишени из меди имеет максимум, а для мишени из серебра – нет. Будет ли возникать такой максимум для мишеней из других металлов, например, железа, цинка, никеля и т.д.? Играет ли роль в возникновении, энергии и величине максимума кристалличность мишени?
4. При облучении первой стенки и дивертора токамака потоки изотопов водорода и других ионов будут падать на нее под различными углами. Учтено ли это при проведении расчетов отражения и распыления?
5. Плотность и шероховатость мишени (первой стенки и дивертора) будет меняться с ростом флюенса ионов. Как скажутся эти эффекты на отражении от поверхности и распылении?
6. Что является физическим обоснованием вынесения плоскости «металлического зеркала» существенно за пределы металлической мишени?

Однако, указанные замечания не снижают общего высокого мнения о представленной работе. В соответствии со сказанным выше считаю, что *диссертация* «Торможение, рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом» *отвечает всем требованиям*, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, установленным в «Положении о порядке присуждения ученых степеней», утверждённом постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842 со всеми дополнениями и изменениями и Положением о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, а *соискатель*, Бабенко Павел Юрьевич, *достоин присуждения ученой степени* доктора 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.karasev@spbstu.ru

