

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор

Московского государственного
университета имени М. В. Ломоносова

д. ф.-м. н., профессор,

член-корреспондент РАН А.А. Федянин



« » _____ 2026 г.

О Т З Ы В

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» на диссертацию **БАБЕНКО Павла Юрьевича «Торможение, рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом»**, представленную на соискание ученой степени **доктора физико-математических наук по специальности 1.3.5 – физическая электроника.**

Актуальность работы

Успехи современной физики связаны с исследованием взаимодействия пучков заряженных частиц с твердым телом и многочисленными приложениями ионно-пучковых технологий для создания новых материалов и диагностики элементного состава и кристаллической структуры твердого тела. В последние годы исследования столкновений атомных частиц с твердым телом интенсивно развиваются в России и за рубежом, что связано с недостаточным пониманием физики происходящих явлений, отсутствием соответствующих моделей. Часто это приводит к различиям предсказаний имеющихся теорий с экспериментом.

При облучении поверхности твердого тела ускоренными ионами одновременно происходит целый ряд разнообразных процессов и явлений, связанных, в частности, с эмиссией вторичных частиц, рассеянием бомбардирующих ионов или их проникновением вглубь мишени. Поэтому диссертационная работа П. Ю. Бабенко, посвященная распылению атомов

твёрдого тела, торможению, рассеянию при столкновениях атомов кэВ-энергий с твёрдым телом, несомненно, является актуальной.

Краткое содержание диссертации

Диссертация П.Ю. Бабенко посвящена торможению, рассеянию и распылению при столкновениях атомов кэВ-энергий с твёрдым телом.

В первой главе диссертации приведен обзор основных публикаций по тематике работы. Показано, что существующие теории, описывающие электронные тормозные потери не учитывают перестройку электронных оболочек при атомных столкновениях. Даны рекомендации по использованию потенциалов межатомного взаимодействия при машинном моделировании. Рассмотрены величины ядерных и электронных потерь энергии при прохождении атомных частиц через вещество. Дан обзор литературных данных о процессах отражения частиц от поверхности твёрдого тела.

Во второй главе приведено описание развитой автором методики компьютерного моделирования взаимодействия атомных частиц с поверхностью твёрдого тела.

В третьей главе рассматриваются различные механизмы неупругих потерь энергии при атомных столкновениях: возбуждение и распад автоионизационных состояний, динамическая ионизация и Оже-переходы в квазимолекуле.

В четвертой главе рассматриваются электронные тормозные потери при атомных столкновениях в твёрдых телах.

В пятой главе рассмотрены ядерные тормозные способности и экранировка взаимодействия частиц в металле.

В шестой главе рассмотрено компьютерное моделирование отражения атомов от поверхности твёрдых тел.

В седьмой главе приведены результаты расчетов методом компьютерного моделирования коэффициентов распыления для большого набора бомбардирующих частиц и мишеней из Ве и W. Исследован широкий энергетический диапазон бомбардирующих атомов от пороговых значений до сотен кэВ.

Научная новизна, практическая ценность и значимость полученных результатов

В диссертации П.Ю. Бабенко преимущественно представлены расчетно-теоретические методы и полученные на их основе результаты. Соискателем

разработан пакет программ для моделирования взаимодействия ионных пучков с веществом, включающий процессы рассеяния, распыления и прохождения заряженных частиц через твердое тело. Следует отметить, что важной особенностью разработанного пакета программ является применение оригинальных расчетно-теоретических моделей, таких как модель выдвижения молекулярных орбиталей и поправка на энергетический спектр отраженных частиц. Также при реализации пакета программ, были применены оригинальные численные подходы, например замена переменных и применение табулированных значений при вычислении интеграла столкновения.

На основе предложенных моделей и с применением разработанного пакета программ был получен ряд важных результатов, определяющих новизну и значимость диссертационной работы. Среди них особо следует отметить:

1. Предложен механизм торможения частиц в веществе, учитывающий образование автоионизационных состояний при столкновениях атомных частиц. Показано, что он вносит основной вклад в электронные тормозные способности для атомов средних масс.
2. Предложено количественное описание основных механизмов образования электронов с непрерывным энергетическим распределением при атомных столкновениях – переход электронов в континуум при выдвижении термов в квазимолекуле (динамическая ионизация) и Оже-переходы в квазимолекуле в процессе столкновения.
3. Впервые определены потенциалы межатомного взаимодействия для столкновений атомных частиц в твердом теле из анализа экспериментальных данных по многократному рассеянию протонов на мишени из золота и прохождению частиц через пленку золота. Предложена теоретическая модель, учитывающая влияние электронов металла на изменение экранировки при взаимодействии частиц, количественно описывающая экспериментальные данные.
4. Рассчитанные значения коэффициентов отражения и распыления для большого числа ионов с мишенями из Be и W позволяют более точно оценивать процессы в пристеночной плазме токамака-реактора.
5. Предложенная модель распыления твердого тела легкими частицами, применима в том числе в припороговой области энергий, что позволяет проводить экспресс-оценку положения энергетического порога распыления.

Обоснованность и достоверность выводов и заключений

Достоверность полученных данных определяется сравнением результатов моделирования нашими кодами с экспериментальными данными и с расчетами других научных групп. Также проводилось сравнение расчетов в приближении парных взаимодействий с расчетом методом молекулярной динамики, сравнение расчетов показало их хорошее согласие. Результаты исследований были обсуждены на научных семинарах в ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, НИИЯФ МГУ имени М.В. Ломоносова, МИФИ, ННГУ имени Н.И. Лобачевского, ЯрГУ им. П.Г. Демидова, РГРТУ имени В.Ф. Уткина и докладывались автором на целом ряде всероссийских и международных конференций. В том числе автором было сделано на этих конференциях 3 приглашенных доклада.

По теме диссертации опубликовано 50 печатных работ в реферируемых журналах, включенных в перечень ВАК РФ и журналах, включенных в базы Web of Science и Scopus. По результатам исследований опубликованы обзоры в журналах ЖЭТФ и УФН.

Диссертация написана в четком и ясном стиле, содержание автореферата соответствует тексту диссертации.

Недостатки в диссертации и автореферате

1. Модель выдвижения молекулярных орбиталей изначально была обоснована для парных соударений атомов. Поэтому имеет смысл рассмотреть, почему данная модель также успешно применима и для моделирования взаимодействия атомных частиц с твердым телом.
2. При сравнении точности описания экспериментальных данных с помощью различных моделей было бы целесообразно указать количество параметров аппроксимации, используемых в каждой модели. Также представляет интерес не только описание известных экспериментальных данных, но и оценка предсказательной силы представленных моделей.
3. В тексте диссертации часто применяются фразеологические обороты вида «наша модель», «наша программа», «насколько известно авторам». Такой стиль представления материала приуменьшает личный вклад автора.

Приведенные замечания не умаляют значение диссертационной работы П.Ю. Бабенко и полученных в ней научных результатов.

Заключение

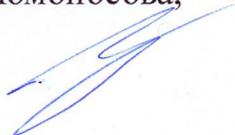
Таким образом, диссертация П.Ю. Бабенко «Торможение, рассеяние и распыление при столкновениях атомов кэВ-энергий с твердым телом» представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком уровне и соответствует всем критериям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной 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 сам Павел Юрьевич Бабенко, безусловно, заслуживает присуждения ему учёной степени *доктора* физико-математических наук по специальности 1.3.5 — *физическая электроника*.

Отзыв составили

Доцент кафедры физической электроники

Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

д.ф.-м. н.

 И.К. Гайнуллин

Заведующий кафедрой физической электроники

Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

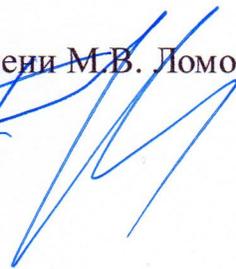
д.ф.-м. н., профессор

 В.С. Черныш

Результаты диссертации рассмотрены и одобрены на заседании научного семинара кафедры физической электроники физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, 26 февраля 2026 года

И.о. декана Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,

д.ф.-м. н., профессор

 В.В. Белокуров

