

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертацию

Аракчеева Алексея Сергеевича

«Теоретическое и экспериментальное исследование плавления, испарения и образования трещин на вольфраме при мощной плазменной нагрузке», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.08 – физика плазмы и 01.04.07 – физика конденсированного состояния.

Диссертационная работа Аракчеева А.С. посвящена исследованию поведения вольфрама под воздействием потока плазмы в условиях, соответствующих ожидаемым для дивертора в термоядерном реакторе типа Токамак. Исследования подобного рода проводятся в различных научных центрах в течение нескольких десятилетий. Ряд проблем, возникающих при удержании плазмы в токамаке, нашел свое решение. В то же время значительное количество задач продолжают оставаться нерешенными. Одна из таких задач связана с взаимодействием горячей плазмы со стенкой термоядерного реактора. Задача имеет два аспекта. Первый. Плазма разрушает материал стенки и тем самым снижает срок службы всего устройства. Второй. Частицы материала стенки попадают в плазму и охлаждают ее, затрудняя протекание реакции синтеза. Оба рассмотренных явления содержат в себе множество эффектов, делающих задачу чрезвычайно сложной как для экспериментального, так и для теоретического изучения. В связи с вышеизложенным, актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений. Большинство исследований, выполненных до появления настоящей работы, касались рассмотрения отдельных аспектов взаимодействия интенсивных потоков плазмы с материалом. В рассматриваемой работе впервые выполнено комплексное изучение различных эффектов и их взаимного влияния. Несомненное достоинство предложенного подхода состоит в

сочетании глубокой теоретической проработки задачи с экспериментальной проверкой сделанных выводов. Оригинальность подхода, реализованного в рассматриваемой диссертации, состоит в использовании допущений, позволяющих получить аналитические решения, удобные с точки зрения определения важнейших факторов, влияющих на интенсивность взаимодействия.

Диссертационная работа удачно структурирована. Решаемые задачи распределены по главам. Глава 1 представляет собой анализ состояния исследований по тематике диссертационной работы. Один из выводов состоит в преобладании термических эффектов при взаимодействии плазмы с материалом дивертора. Глава 2 посвящена теоретическому рассмотрению эффектов, имеющих место при плавлении и испарении вольфрама во время его взаимодействия с потоком плазмы. Рассмотрены два эффекта. Первый – паровое экранирование. На основе оценок с использованием трех аналитических моделей получен важный результат, состоящий в том, что поглощенная материалом энергия определяется не мощностью потока, но параметрами облучаемого материала и длительностью облучения. Второй эффект, также связанный с испарением, заключается в уносе энергии из мишени потоком испаренного материала. Как показали оценки, этот эффект еще более важен для установления теплового баланса и достижения максимальных температур поверхностью облучаемого материала. Обоснованность этого научного положения подтверждена экспериментальными измерениями, выполненными автором диссертационной работы. Важнейшие результаты получены по итогам решения задачи о механических напряжениях, возникающих в металле при чередующихся энергетических нагрузках. Найдены критерии, по которым следует оценивать число импульсов, при превышении которого в металле появляются трещины, приводящие затем к отслаиванию макроскопических фрагментов. Соответствующие расчеты представлены в главах 3 и 4. Проведение расчетов напряжений, вызывающих образование трещин параллельных поверхности, потребовало от автора

диссертации значительных математических усилий. Эти усилия вылились в оригинальное решение системы уравнений, позволившее найти деформации и напряжения вокруг трещины перпендикулярной поверхности металла.

Значительная часть диссертационной работы посвящена экспериментальным исследованиям, направленным как на проверку выводов, сформулированных по итогам теоретической работы, так и на изучение эффектов, которым еще предстоит теоретическое осмысление. Основная часть экспериментальных результатов сосредоточена в пятой главе. В качестве несомненного достижения следует отметить разработку сложнейшей методики измерения деформаций, вызванных тепловой нагрузкой. Как сама методика, так и полученные с ее применением результаты, относящиеся к эффекту вращения плоскости атомной решетки, а также наличию остаточной пластической деформации, обладают научной новизной. Выполненная диссертационная работа представляет собой весомый вклад в теорию взаимодействия термоядерной плазмы со стенкой реактора. В то же время, сформулированные выводы обладают практической значимостью, поскольку указывают пути преодоления разрушительного воздействия плазмы на материал стенки в условиях термоядерного синтеза.

Диссертационная работа обладает всеми признаками законченного научного исследования, в котором изложены как теоретические положения, так и экспериментальные результаты, достаточные для того, чтобы быть квалифицированы как научное достижение.

Результаты исследований достаточно полно опубликованы в периодических изданиях и текстах докладов на конференциях различного уровня. Содержание диссертации соответствует специальностям 01.04.08 – физика плазмы и 01.04.07 – физика конденсированного состояния. Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации и отражает основные достижения соискателя.

По рассматриваемой работе может быть сделано замечание.

В главе 2 диссертации указывается на возможность плавления поверхностного слоя вольфрама при импульсном тепловом воздействии с последующим затвердеванием. В то же время, при рассмотрении в главах 3 и 4 процессов, приводящих к образованию трещин, явления плавления и затвердевания во внимание не принимаются.

Отмеченные недостатки не затрагивают сущности<sup>\*</sup> научных положений, выносимых на защиту. Диссертационная работа соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к докторским диссертациям. Автор работы Аракчеев Алексей Сергеевич достоин присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.08 – физика плазмы и 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент - доктор технических наук,

профессор  Бурдовицин Виктор Алексеевич,

профессор кафедры физики Томского университета систем управления и радиоэлектроники.

Адрес: ул. 19 Гвардейской дивизии 15, кв. 25. 634045, Томск. Тел. 913-804-94-67. E-mail: burdov@fet.tusur.ru

Подпись В.А. Бурдовицкого удостоверяю

## Ученый секретарь университета

 - Прокопчук Е. В.

05 АПР 2021

