

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА
на диссертацию Касатова Александра Александровича
«ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ И ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ
МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКИХ IN SITU ДИАГНОСТИК»
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.9. Физика плазмы

Открытые магнитные системы значительно проще токамаков с инженерной точки зрения, особенно если речь идет об осесимметричных конфигурациях. Однако в настоящее время открытые ловушки серьёзно отстают от токамаков по параметрам удерживаемой плазмы. Для того чтобы сделать открытые магнитные системы конкурентоспособными, необходимы новые физические модели, адекватно описывающие механизмы удержания плазмы. Важным моментом для создания и верификации таких моделей является определение параметров плазмы, в частности, плотности и температуры с высоким временным и пространственным разрешением.

Ещё одной важной проблемой на пути превращения открытых ловушек в термоядерные реакторы является то, что при увеличении энергосодержания удерживаемой плазмы и достижении сопоставимых с токамаками параметров неизбежно начнутся процессы разрушения обращенных к плазме элементов вакуумной камеры. Стойкость элементов первой стенки является одной из основных проблем крупномасштабных термоядерных установок. Эрозия материалов стенки уже сейчас является одной из ключевых проблем при реализации проектов термоядерных установок будущего сравнимых с ИТЭР или ТРТ. Это потребует развития диагностических систем способных предоставить достоверные сведения о том, что будет происходить с поверхностью наиболее нагруженных элементов первой стенки при стационарных нагрузках и импульсных переходных процессах.

Последние годы характеризуются развитием ряда эффективных оптических методов диагностики неравновесной турбулентной плазмы и диагностики эрозии обращенных к плазме элементов первой стенки. Представленная работа решает задачи именно такого характера, результатом чего стали:

- получение новых экспериментальных данных о механизмах взаимодействия плазмы и мощных импульсных электронных пучков, с помощью модернизированного лазерного комплекса, способного производить два измерения с управляемой в широких пределах задержкой между ними, а также трех систем сбора рассеянного излучения по длине установки с возможностью одновременного использования двух из них. Возможность измерения профиля электронной плотности в разных сечениях по длине

открытой ловушки особенно важна при исследовании неравновесной плазмы открытых магнитных систем.

- изучение механизмов эрозии поверхности мишени с образованием микрочастиц при мощном импульсном тепловом воздействии, что стало возможным благодаря разработке и созданию диагностик малоуглового лазерного рассеяния, спектрометрии, многокурсовой фотографии и быстрой пирометрии, а также разработке методик обработки сигналов и их реализация в виде программного кода на высокоуровневом языке с учётом особенностей диагностических комплексов.

Целью первой главы была глубокая модернизация диагностики томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3. Для определения электронной плотности и температуры с высоким (10 нс – 100 мкс) временным разрешением, что позволило производить два независимых измерения за один цикл работы установки с возможностью сбора рассеянного излучения в нескольких точках по длине плазменного шнура.

Целью второй главы стала разработка комплекса оптических *in situ* диагностик для изучения процессов, происходящих при воздействии мощных импульсных тепловых нагрузок на поверхности материалов, перспективных для покрытия обращенных к плазме компонентов.

Целью третьей главы стало изучение условий и механизмов появления микрочастиц, вылетающих с поверхности при мощном тепловом воздействии, определение их характерных размеров, скоростей и плотностей потоков.

Измерение n_e T_e за один цикл работы установки ГОЛ-3 в двух точках вдоль оси плазменного шнура в два момента времени за один импульс работы установки с высоким временным, до 80 нс, и пространственным, до 2 мм разрешением, является **актуальной задачей** для контроля мелкомасштабных флуктуаций плотности, измерения динамики неравновесной функции распределения электронной компоненты и, в конечном итоге, для отработки технологических режимов работы линейных открытых магнитных системы удержания термоядерной плазмы.

Другим аспектом представленной работы, обеспечивающим её **актуальность**, является создание на установке БЕТА уникального диагностического комплекса оптических *in-situ* диагностик, включающего в себя диагностики малоуглового лазерного рассеяния, спектрометрии, многокурсовой фотографии и быстрой пирометрии для исследований каплевой эрозии материалов при воздействии мощных импульсных тепловых нагрузок на поверхность. Диагностический комплекс позволяет измерять скорости, размеры и места вылета микрочастиц, а кроме этого, регистрировать температуру поверхности с высоким временным и пространственным разрешением. Созданный

диагностический комплекс позволил исследовать распределение и места вылета микрочастиц вольфрама с поверхности, подвергнутой мощной импульсной тепловой нагрузке. Обнаружено, что вылет частиц происходит после окончания импульсной нагрузки, что соответствует модели вскипания расплавленного слоя при ударном квазистационарном тепловом воздействии. При этом места вылета частиц локализуются по границам образовавшихся на поверхности трещин, а характерный размер частиц лежит в диапазоне 2–10 мкм, что также является **актуальной задачей** для отработки режимов работы термоядерных установок с минимизацией эрозии первой стенки. В связи с этим, работа Касатова А.А., несомненно, является **актуальной** и вносит значительный вклад в понимание физических процессов происходящих в плазме линейных установок УТС, процессов разрушения вольфрамовых элементов первой стенки, а также имеет прикладной характер, связанный с развитием методов диагностики плазмы и продуктов эрозии первой стенки.

Степень обоснованности научных положений и выводов

Сформулированные в работе научные положения и выводы основаны на результатах анализа литературных источников по теме диссертации и большом объеме экспериментальных данных, полученных с различных независимых диагностик. Обоснованность научных положений и выводов не вызывает сомнений, так как они ясно следуют из представленных в диссертации результатов.

Достоверность результатов

Достоверность обеспечивается хорошей воспроизводимостью большого объема полученных экспериментальных результатов, их непротиворечивостью как между собой, так и с результатами численного моделирования. Большинство выводов сделаны с использованием спектральных и байесовских статистических методов обработки экспериментальных данных. Анализ ряда результатов исследования показывает хорошее соответствие с теоретическими и экспериментальными данными полученными другими авторами. Основные результаты по теме диссертации представлены в 8 печатных и электронных изданиях, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК и 4 в сборниках тезисов и трудах научных конференций.

Научная новизна диссертации

Для характеристики научной новизны диссертации добавим к сказанному выше краткий перечень самых важных результатов.

1. Впервые, на установке ГОЛ–3 создан диагностический комплекс томсоновского рассеяния, способный измерять радиальные профили температуры и плотности электронной компоненты в двух точках вдоль оси плазменного столба в два заранее

заданных момента времени за один импульс работы установки. Получены новые экспериментальные данные необходимые для понимания механизмов взаимодействия плазмы и электронных пучков.

2. На установке БЕТА создан уникальный комплекс оптических невозмущающих *in situ* диагностик, включающий в себя диагностики малоуглового лазерного рассеяния, спектрометрии, многокурсовой фотографии и быстрой пирометрии для исследований капельной эрозии материалов при воздействии мощных импульсных тепловых нагрузок на поверхность. Диагностический комплекс позволяет измерять скорости, размеры и места вылета микрочастиц, а кроме этого, регистрировать температуру поверхности с высоким временным и пространственным разрешением.

3. Впервые измерены распределение и места вылета микрочастиц вольфрама с поверхности, подвергнутой мощной импульсной тепловой нагрузке. Обнаружено, что вылет частиц происходит после окончания импульсной нагрузки, что соответствует модели вскипания расплавленного слоя при ударном квазистационарном тепловом воздействии. При этом места вылета частиц локализуются по границам образовавшихся на поверхности трещин, а характерный размер частиц лежит в диапазоне 2–10 мкм.

Соответствие содержания автореферата диссертации

Содержание автореферата соответствует содержанию и тематике диссертации.

Замечания по диссертационной работе

Работа написана очень качественно и практически без опечаток. Приведенные ниже замечания носят скорее дискуссионный характер.

Первое замечание касается раздела 1.1, в котором детальнейшим образом описываются физические аспекты диагностики томсоновского рассеяния. Однако для столь подробного изложения теории томсоновского рассеяния на мой взгляд не хватает ссылки на приближенную "рабочую" формулу учитывающую релятивистскую поправку: [*Analytic formula for fully relativistic Thomson scattering spectrum O. Naito, H. Yoshida, and T. Matoba Phys. Fluids B 5, 4256 (1993); doi: 10.1063/1.860593*]. Можно было бы также привести и ссылку на А.Б. Кукушкина с подробным выводом и полной формулой для сечения томсоновского рассеяния объемом релятивистской плазмы [*1981 т 7 вып 1 стр 110-118 ФИЗИКА ПЛАЗМЫ Кукушкин А.Б. Некогерентное рассеяние света конечным объемом релятивистской плазмы*].

Второе замечание касается калибровки абсолютной чувствительности камеры и диода диагностики SWIR пирометрии, которая проводилась по вольфрамовой ленточной лампе СИ-10-300 помещенной внутрь вакуумной камеры вместо образцов. Данный метод действительно позволяет учесть спектральную характеристику всего оптического тракта,

однако полагаться на эту калибровку при измерении температуры исследуемой поверхности можно с определенными оговорками. Так в статье [M. Ben Yaala, M.-H. Aumeunier R. Steiner M. Schönenberger C. Martin M. Le Bohec C. Talatizi L. Marot and E. Meyer "Bidirectional reflectance measurement of tungsten samples to assess reflection model in WEST tokamak" Rev. Sci. Instrum. 92, 093501 (2021); doi:10.1063/5.0046140] показано, что для четырех образцов вольфрама имеющих шероховатость изменяющуюся в диапазоне от $R_a=0.06$ до $1.12 \mu m$ угловая зависимость индикатрисы излучения в разной степени отличается от ламбертовского распределения и изменяется с длиной волны (см Fig.10).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Заключение

Диссертация «Исследования плазмы и обращённых к плазме материалов с помощью оптических in situ диагностик» Касатова Александра Александровича представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, выполненную автором на высоком уровне. Считаю, что диссертация Касатова А.А. по специальности 1.3.9.Физика плазмы полностью соответствует всем требованиям пп.9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а сам Касатов А.А. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Я, Мухин Евгений Евгеньевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Касатова Александра Александровича, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент:

Ведущий научный сотрудник, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,

кандидат физико-математических наук

194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26.

E-mail: e.mukhin@mail.ioffe.ru

Тел.: +7 (950) 0078749

/ Мухин Евгений Евгеньевич/

Дата: 11.09.2025

Подпись Мухина Е.Е. заверяю

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН,

кандидат физико-математических наук

Патров Михаил Иванович/

Дата: 11.09.2025

