



ТРИНИТИ
РОСАТОМ

ОРГАНИЗАЦИЯ АО «РОСАТОМ НАУКА»

**Акционерное общество
«Государственный научный центр
Российской Федерации
Троицкий институт инновационных
и термоядерных исследований»
(АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»)**

ул. Пушкиных, дом 12,
г. Москва, г. Троицк, 108840

Телефон (495) 841-56-80

E-mail: liner@triniti.ru

ОКПО 08624272, ОГРН 1157746176400

ИНН 7751002460, КПП 775101001

УТВЕРЖДАЮ

Врио генерального директора
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
доктор философии (PhD)

Воронов Алексей Сергеевич



«22» октября 2025 г.

_____ № _____
На № _____ от _____

ОТЗЫВ

ведущей организации

Акционерного общества «Государственный научный центр Российской
Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований»

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 в диссертационный совет 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

Актуальность исследования

Диссертационная работа Касатова Александра Александровича посвящена исследованиям параметров плазмы открытой магнитной ловушки ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) с использованием усовершенствованной диагностики томсоновского рассеяния, а также исследованиям разрушения вольфрамовых защитных покрытий и характеристик продуктов эрозии обращенных к плазме материалов вакуумной камеры термоядерного реактора. Актуальность работы обусловлена необходимостью развития альтернативных токамакам систем управляемого термоядерного синтеза (УТС) и исследования поведения плазмы в таких системах. Выполненная работа дает весомый вклад в решение одной из

актуальнейших задач в области УТС – выбора конструкции и материалов защитных покрытий вакуумной камеры термоядерного реактора. Тема диссертации и содержание работы соответствует паспорту научной специальности 1.3.9 Физика плазмы.

Научная новизна работы

Получены новые данные о распределениях плотности и температуры плазмы в экспериментах с релятивистским и слаборелятивистским электронным пучком на установке ГОЛ-3 с применением созданного диагностического комплекса томсоновского лазерного рассеяния, позволяющего измерять радиальные профили температуры и плотности электронной компоненты плазмы в двух точках вдоль оси плазменного столба в два заранее заданных момента времени за один пуск установки.

На установке БЕТА создан уникальный комплекс оптических диагностик, позволяющих проводить измерения в режиме реального времени, который включает в себя: малоугловое лазерное рассеяние, спектрометрию, многоракурсную фотографию и быструю пирометрию. С помощью этого комплекса получены экспериментальные данные о характеристиках продуктов капельной эрозии вольфрама при воздействии мощных тепловых потоков, а именно: скорости капель могут достигать значений 100 – 250 м/с, их характерные размеры составляют 2 – 10 мкм, при этом существует обратная зависимость между скоростью и размером частиц. Наиболее интенсивный выброс частиц происходит из областей, покрытых сеткой трещин.

Содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Полный объём диссертации составляет 140 страниц, включая 95 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 130 наименований.

Во введении обосновывается актуальность и выбор темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследования, перечислены выносимые на защиту положения, описаны научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость полученных результатов. Представлена информация об апробации результатов, публикациях, личном вкладе автора, а также – о структуре диссертации.

Первая глава посвящена системе томсоновского рассеяния в открытой гофрированной ловушке ГОЛ-3. Проанализирована роль этого метода в диагностике термоядерной плазмы, описаны теоретические основы его работы. Приведено описание устройства установки ГОЛ-3 и отмечены особенности в работе установки. На основании этого сформулирован ряд требований, после чего подробно описаны выбранная к реализации схема диагностики, ее отдельные узлы и их характеристики. Отдельное внимание уделено методике обработки экспериментальных данных. Приведены результаты измерений радиальных

профилей температуры и плотности электронной компоненты плазмы в экспериментах с релятивистским (0,8 МэВ) и слаборелятивистским (100 кэВ) электронным пучком. Делается вывод о наличии быстрых флуктуаций плотности плазмы при инъекции релятивистского электронного пучка.

Во второй главе описаны бесконтактные оптические диагностики на установке БЕТА для исследования механизмов эрозии материалов при мощных тепловых воздействиях. Приведена подробная схема и принципы работы установки БЕТА. Отмечены особенности моделирования теплового воздействия на обращенные к плазме покрытия вакуумной камеры ТЯР во время быстрых плазменных процессов в токамаках с помощью пучка электронов. Подробно рассмотрены диагностика параметров абляционного факела, система многокурсовой быстрой фотографии для регистрации микрочастиц и SWIR пирометрия с пространственным и временным разрешением. С их помощью получены экспериментальные данные о скорости расширения и спектральном составе излучения абляционного факела, возникающего над поверхностью вольфрамовых мишеней при воздействии мощного пучка электронов. Исходя из измеренной динамики температуры поверхности мишени было рассчитано давление паров вольфрама над ней и показано, что результаты численного моделирования нагрева вольфрама тепловым импульсом хорошо согласуются с экспериментальными данными, адекватно воспроизводя момент появления абляционного факела. С помощью трехкурсовой быстрой фотографии определен момент рождения микрочастиц, измерены проекции их скорости и локализованы области вылета. Установлено, что наибольшее количество частиц образуется из перегретых областей, соответствующих краям трещин. Применение диагностики SWIR пирометрии позволило измерить пороговые тепловые нагрузки, при которых начинается образование трещин в материале при импульсном тепловом воздействии.

Третья глава посвящена исследованию капельной эрозии вольфрама при мощном тепловом воздействии с помощью диагностики малоуглового лазерного рассеяния. Подробно описана теория рассеяния лазерного излучения микрочастицами и реализация диагностики малоуглового лазерного рассеяния на установке БЕТА. Определены пороговые тепловые нагрузки, при которых наблюдается выброс вольфрамовых микрочастиц, вычислены их размеры, момент образования и проекции нормальной к поверхности мишени скорости. Приведена оценка потерь массы вольфрамовых мишеней за счет капельной эрозии. Система малоуглового лазерного рассеяния позволила не только определить размеры микрочастиц, но и установить зависимость между размером частицы и ее скоростью.

В заключении представлены основные результаты и выводы работы.

Наиболее значимые результаты, полученные автором работы

На установке ГОЛ–3 создана двуимпульсная диагностика томсоновского лазерного рассеяния. С ее помощью в различных режимах работы установки проведены измерения радиальных распределений плотности и температуры плазмы с временным и пространственным разрешением по длине плазменного шнура.

На установке БЕТА спроектирован и введен в эксплуатацию комплекс оптических диагностик, работающих в режиме реального времени, для исследований капельной эрозии материалов при воздействии мощных тепловых потоков на поверхность. С помощью этого комплекса измерены скорости, размеры и места вылета микрочастиц с поверхности вольфрамовых мишеней, зарегистрирована динамика температуры на поверхности, определены тепловые нагрузки, при которых начинается растрескивание вольфрама и интенсивный выброс частиц. Установлено, что вылет микрочастиц происходит практически одновременно, сразу после окончания импульса теплового воздействия, при этом скорости микрочастиц могут достигают 250-350 м/с, а их характерный размер составляет 2-10 мкм. Определен вид функциональной зависимости между размером микрочастиц и их скоростью. Показано, что вылет микрочастиц происходит преимущественно из областей с подавленной теплопроводностью, таких как края трещин.

Научная и практическая значимость результатов

Автор диссертационной работы обосновал и успешно применил в эксперименте на открытой гофрированной ловушке ГОЛ–3 двуимпульсную диагностику томсоновского лазерного рассеяния. Благодаря этому была реализована возможность исследовать динамику концентрации и температуры плазмы с пространственным разрешением по длине плазменного шнура. Помимо этого, для исследования механизмов эрозии и свойств продуктов капельной эрозии материалов, автором разработаны и реализованы бесконтактные методы диагностики на установке БЕТА. С помощью этих диагностик получены экспериментальные данные о скорости расширения и спектральном составе излучения абляционного факела, возникающего над поверхностью вольфрамовых мишеней, измерены пороговые тепловые нагрузки, при которых начинается растрескивание вольфрама, определен момент рождения микрочастиц, измерены проекции их скорости и локализованы области вылета. Полученные результаты могут быть использованы для оценки количества и свойств продуктов капельной эрозии, накапливающихся внутри вакуумной камеры термоядерного реактора. Результаты диссертационной работы могут послужить основой для разработки системы контроля растрескивания облицовочных покрытий вакуумной камеры в режиме реального времени.

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность результатов работы определяется использованием при проведении измерений современных методов исследований, соответствующего оборудования и применением статистических методов обработки полученных данных, а также воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов, получаемых разными методами. Материалы диссертационного исследования многократно обсуждались на семинарах ИЯФ СО РАН, а также были представлены в виде 12 докладов на всероссийских и международных конференциях. Результаты и положения диссертации опубликованы в 8-ми печатных трудах, 4 из которых – в виде статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК, что также подтверждает их достоверность.

Личный вклад автора

Все результаты, на основе которых сформулированы защищаемые положения и выводы диссертации, получены автором лично.

По работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. Тема диссертационной работы сформулирована недостаточно конкретно.
2. В тексте диссертации хотелось бы увидеть больше подробностей, касающихся измерения профиля температуры плазмы на установке ГОЛ-3, в том числе методики определения погрешностей.
3. Было бы полезным оценить влияние растрескивания материала на коэффициент серости и, соответственно, результаты измерения температуры вольфрамовых мишеней.
4. В тексте работы недостаточно подробно описана методика обработки экспериментальных данных, полученных с помощью системы малоуглового лазерного рассеяния для измерения распределения частиц по размерам.

Однако, указанные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы и не снижают ценности полученных в ней результатов.

Заключение

Диссертация Касатова А.А. представляет собой законченную научную работу, направленную на развитие методов бесконтактной диагностики плазмы и исследование свойств продуктов эрозии материалов при мощных тепловых воздействиях. Достоверность полученных данных обусловлена тщательной калибровкой измерительной аппаратуры, воспроизводимостью и непротиворечивостью результатов многочисленных экспериментов. Все результаты, на основе которых сформулированы выводы диссертации, получены автором лично. Автореферат полностью отражает содержание диссертационной работы, тема и материалы которой соответствуют специальности 1.3.9 – Физика

плазмы. Материалы диссертации опубликованы в ведущих научных журналах, входящих в перечень ВАК РФ, доложены на международных и российских конференциях. Основные публикации автора по теме работы корректно и полно отражают содержание диссертации и ее основные результаты.

Описанные в работе результаты могут быть использованы в фундаментальных и прикладных исследованиях по программе УТС в научно-исследовательских институтах, ведущих исследования по программе УТС (НИЦ “Курчатовский институт”, НИЯУ МИФИ, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН), а также лабораториях, разрабатывающих и использующих мощные источники плазмы для решения научных и прикладных задач.

По актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертация А.А. Касатова «Исследования плазмы и обращённых к плазме материалов с помощью оптических *in situ* диагностик» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Касатов Александр Александрович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы за развитие системы томсоновского рассеяния с высоким временным разрешением и создание комплекса диагностик для изучения процессов разрушения обращенных к плазме материалов.

Отзыв составил:

ведущий научный сотрудник,
кандидат физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика
плазмы
тел. +7 (495) 841-53-09
e-mail: pozn@triniti.ru

 Позняк Игорь Михайлович
22.10.2025 г.

Диссертация Касатова А.А. рассмотрена на открытом заседании секции №3 Научного совета АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» «Физика импульсных твердотельных лазерных систем, плазменных ускорителей и взаимодействия излучения мощных

лазеров и плазменных потоков с веществом» (108840, г. Москва, г. Троицк,
ул. Пушкиных, д. 12, тел. +7 (495) 841-53-09, liner@triniti.ru, https://www.triniti.ru/)
22 октября 2025 г протокол № 8.

Заместитель председателя секции №3
Научного совета АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
кандидат физико-математических наук,


Житлухин Анатолий Михайлович
22.10.2025 г.

Ученый секретарь секции №3
Научного совета АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
кандидат физико-математических наук,


Гуторов Константин Михайлович
22.10.2025 г.

Подписи И.М. Позняка, А.М. Житлухина, К.М. Гуторова заверяю:
ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»,
кандидат физико-математических наук,


Ежов Александр Александрович
22.10.2025 г.

