

На правах рукописи

Касатов

Касатов Александр Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЫ И ОБРАЩЁННЫХ К
ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ
ОПТИЧЕСКИХ IN SITU ДИАГНОСТИК**

1.3.9. Физика плазмы

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ – доктор физико-математических наук, доцент Вячеслав Леонид Николаевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Водопьянов Александр Валентинович – доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук», г. Нижний Новгород, заведующий отделом;

Мухин Евгений Евгеньевич – кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией;

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ – Акционерное общество "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований"

Защита диссертации состоится «11» ноября 2025 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.162.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук и на сайте <https://inp.nsk.su/obrazovanie/dissertatsionnye-sovety#24-1-162-02>.

Автореферат разослан «10» сентября 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук,
профессор РАН



Лотов Константин
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования

Постоянный рост мирового энергопотребления в совокупности с ограниченностью запасов ископаемого топлива требует поиска новых, желательно возобновляемых, источников энергии. Управляемый термоядерный синтез — один из возможных путей решения данной проблемы. Наличие большого количества необходимого топлива и минимальное воздействие на окружающую среду делает этот подход довольно перспективным. Более того, в связи с прогрессом в области магнитного удержания высокотемпературной плазмы, достигнутым за последние несколько десятилетий, представляется возможным создание энергетического термоядерного реактора в ближайшем будущем.

Важным шагом на этом пути является проект ИТЭР: международный экспериментальный термоядерный реактор, крупнейший проект по магнитному удержанию высокотемпературной плазмы на данный момент. Его основная цель заключается в том, чтобы доказать целесообразность термоядерного синтеза в качестве крупномасштабного и безуглеродного источника энергии. После достижения целей ИТЭР планируется реализация проекта DEMO — прототипа электростанции, использующей термоядерный синтез. Также важно отметить проекты токамаков ТРТ (Токамак с Реакторными Технологиями) и CFETR (China Fusion Engineering Test Reactor), которые закроют пробелы между ИТЭР и демонстрационным реактором.

Помимо классических токамаков, таких как T-15МД, JET или EAST, существует большое количество альтернативных систем для управляемого термоядерного синтеза. Популярность получили сферические токамаки, такие как ST-40, Глобус-М, и курируемая управлением по атомной энергии Соединенного Королевства программа сферического токамака STEP. Кроме этого, важно упомянуть системы на основе открытых магнитных конфигураций, такие как ГОЛ-3, ГДЛ, проект ГДМЛ, реализуемый в ИЯФ СО РАН, и родственные им системы с обращенным магнитным полем, например C-2W/Norman от TAE Technologies. Проект ГДМЛ является флагманской установкой для развития источников нейтронов и термоядерных реакторов на основе открытых магнитных систем.

Открытые магнитные системы значительно проще токамаков с инженерной точки зрения, особенно если речь идет об осесимметричных конфигурациях. Подобные системы имеют возможность удерживать плазму с высоким, порядка единицы, коэффициентом отношения давления плазмы к давлению магнитного поля $\beta = \frac{8\pi P_p}{B^2}$, где P_p — давление плазмы, B — напряженность магнитного поля. Кроме того, в открытых системах существует естественный канал удаления примесей и продуктов термоядерных реакций, который также можно использовать для прямого

преобразования тепловой энергии плазмы в полезную работу с высоким коэффициентом полезного действия.

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. При этом важно отметить, что открытые магнитные системы существенно отличаются от тороидальных, где свойства плазмы практически не меняются вдоль тороидальной оси. В открытых конфигурациях характеристики плазмы, как правило, сильно неоднородны вдоль оси установки, что выдвигает дополнительные требования к диагностикам.

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. Эрозия материалов стенки уже сейчас является одной из ключевых проблем при реализации проекта ИТЭР. Вполне очевидно, что перспективы развития любых крупномасштабных термоядерных установок требуют достоверных сведений о том, что будет происходить с поверхностью обращенных к плазме элементов при стационарных нагрузках и импульсных переходных процессах.

Таким образом, для создания новых систем субреакторного класса на базе открытых ловушек необходимо развитие новых физических моделей и изучение механизмов разрушения материалов. Приблизиться к решению данных проблем возможно при наличии достоверных данных о протекающих процессах, а получение этих данных, в свою очередь, требует наличия широкого спектра диагностик, в частности, оптических. Всё вышперечисленное делает тему по развитию методов для исследования плазмы и процессов эрозии обращенных к плазме материалов чрезвычайно актуальной.

Степень разработанности темы исследования

Оптические методы диагностики широко используются при определении параметров высокотемпературной плазмы. Среди этих методов особое положение занимает томсоновское рассеяние. Несмотря на техническую сложность, эта диагностика давно является основным методом измерения профилей плотности и температуры электронной компоненты плазмы. Открытые магнитные системы в ИЯФ СО РАН в этом отношении не составляют исключения, однако диагностика томсоновского рассеяния на этих установках имеет ряд особенностей. Важной для открытых систем является необходимость получения информации не только о радиальном профиле

плотности и температуры, но и об изменении этих параметров вдоль оси плазменного шнура. Кроме того, функция распределения электронов может существенно отклоняться от равновесного состояния, а в плазме могут содержаться частицы материала стенки. Все эти факторы необходимо учитывать при разработке диагностики томсоновского рассеяния в случаях, когда возникают новые задачи на существующих установках, а также при создании новых установок.

Помимо пространственного разрешения, не меньший интерес для физики открытых ловушек представляет высокое временное разрешение, особенно когда речь идет о инъекции микросекундных пучков в плазму. Частотные твердотельные лазеры в режиме гигантского импульса широко используются для диагностики длительных разрядов в токамаке (десятки и более секунд), но данные источники излучения не способны работать на мегагерцовых частотах. Разработка диагностических источников представляет существенную трудность и привлекает много внимания.

В системах магнитного удержания стационарные тепловые нагрузки на обращенные к плазме элементы приводят к десорбции вещества, и для того чтобы эти примеси не проникали в центральную область и не приводили к росту радиационных потерь, их необходимо удалять с периферии плазменного шнура. В открытых магнитных системах и некоторых токамаках плазмодриемники выполнены в виде диафрагм, называемых лимитерами, которые контактируют с внешней частью плазменного шнура. В большинстве токамаков для этих целей внешние слои плазменного шнура направляются на плазмодриемник, называемый дивертором, на котором плазма охлаждается, нейтрализуется, а получившийся газ откачивается из вакуумной камеры. Кроме того, в такой конфигурации существует возможность вывода продуктов термоядерных реакций на пластины дивертора.

По сравнению с существующими установками, разрабатываемые системы, такие как ИТЭР, ТРТ или ГДМЛ, будут иметь существенно больший поток тепла на элементы вакуумной камеры, обращенные к плазме, и большую длительность разряда, что может привести к повреждениям этих элементов. В настоящее время, по мнению ряда авторов, эта проблема является одной из основных нерешенных задач проекта ИТЭР, ведь именно взаимодействие плазмы с поверхностью первой стенки в системах магнитного удержания будет является ключевым фактором определяющие параметры всей установки. Создание теории, подробно описывающей механизмы взаимодействия мощных импульсных потоков энергии и частиц с материалами, является важной задачей для успешной реализации проекта ИТЭР и последующего создания энергетического термоядерного реактора. Необходимо отметить, что системы для удержания высокотемпературной плазмы на основе открытых ловушек и иных конфигураций при достижении сопоставимых параметров будут иметь те же самые проблемы с обращенными к плазме компонентами.

В условиях ИТЭР предполагаемые стационарные нагрузки на поверхность первой стенки и дивертора будут достигать 5 МВт/м^2 и $10-20 \text{ МВт/м}^2$ соответственно. Такое воздействие будет приводить к модификации материалов: накоплению в них водорода и гелия, появлению трещин на поверхности и так далее. Особую опасность для дивертора представляют мощные импульсные потоки частиц и энергий. При таких событиях тепловые нагрузки могут достигать $50-1000 \text{ МВт/м}^2$, что может приводить к значительным повреждениям первой стенки и дивертора.

Изучение процессов взаимодействия плазмы с материалами первой стенки и дивертора велось на различных установках магнитного удержания, таких как ГОЛ-3, ASDEX Upgrade, LHD, JET и других. Однако нагрузки на компоненты вакуумной камеры, ожидаемые в ИТЭР и других перспективных машинах, будут значительно выше, чем в существующих установках, что требует создания специализированных устройств для изучения процессов взаимодействия плазмы с поверхностью при различной длительности воздействия.

При стационарных и импульсных нагрузках ниже порога плавления изучаются процессы распыления, термоциклирования, образование трещин, накопления гелия и изотопов водорода, формирования смешанных поверхностных слоев, образования структур при облучения вольфрама гелиевой плазмой. При высоких импульсных тепловых нагрузках на поверхность, соответствующих быстрым переходным процессам, таким как ЭЛМы (ELMs — edge-localized mode, моды локализованные на краю, квазипериодические неустойчивости в приграничной области плазмы), существенный интерес представляют механизмы движения расплавленного слоя и образования микрочастиц.

При воздействии мощного потока нейтронов (в том числе и быстрых) исследуются повреждение кристаллической решетки и трансмутация элементов. Нейтронное облучение оказывает значительное влияние на материалы, приводя к изменению их термомеханических свойств, включая охрупчивание и активацию. Продуктами некоторых происходящих ядерных реакций являются газы (реакции (n, α) и (n, p)), которые могут вызвать увеличение объема материала. Стоит отметить, что данная область затрагивает не только материалы элементов, непосредственно обращенных к плазме, но и материалы иных компонентов реактора, например, конструкционные стали.

Как видно из представленного выше, разрушение обращенных к плазме материалов представляет собой комплекс нерешенных проблем, привлекающий к себе большое внимание в термоядерном сообществе. Для экспериментального моделирования нагрузок на поверхность материалов в условиях, ожидаемых в ИТЭР и других перспективных системах, используются различные типы установок в зависимости от решаемых задач:

1. специализированные токамаки – КТМ;

2. электронные пучки – HELCZA, JUDITH2, BETA;
3. ионные и нейтральные пучки – GLADIS, MARION;
4. плазменные установки – PISCES-B, PSI-2, Magnum-PSI, Pilot-PSI, КСПУ-Т и МК-200, установка с геликоновым плазменным источником в ИЯФ СО РАН (в разработке);
5. лазеры – лазер на BETA, лазер в Forschungszentrum Jülich;
6. ядерные реакторы и иные источники нейтронов – Joyo, BR2, IFMIF-DONES (в разработке);

Особого внимания заслуживает уникальный комплекс испытательных установок, разработанный в Научно-исследовательском институте электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова (НИИЭФА).

В значительной части этих исследований используют post-mortem анализ повреждений, вызванных воздействием различных нагрузок. Безусловно, результаты этих исследований имеют большую научную ценность, однако в ряде случаев крайне важно наблюдать протекающие процессы непосредственно в ходе нагрузки и сразу после неё. В частности, при воздействии импульсной тепловой нагрузки на поверхность образца необходимо изучение динамики движения расплавленного слоя, а также определение скорости и размера микрочастиц, вылетающих из него. Кажется разумным, что оптические методы, хорошо развитые для диагностики высокотемпературной плазмы, могут быть применены и для изучения процессов эрозии материалов под действием мощной импульсной тепловой нагрузки.

Цели и задачи

Целью данной работы являлось:

1. Глубокая модернизация диагностики томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3. Для определения электронной плотности и температуры с высоким (10 нс – 100 мкс) временным разрешением обновленная система должна производить два независимых диагностических лазерных импульса за один цикл работы установки с возможностью сбора рассеянного излучения в нескольких точках по длине плазменного шнура.
2. 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.
3. Изучение условий и механизмов появления микрочастиц, вылетающих с поверхности при мощном тепловом воздействии, определение их характерных размеров, скоростей и плотностей потоков.

Для достижения поставленных целей были выделены следующие **задачи**:

1. Создание лазерного комплекса, способного производить два диагностических лазерных импульса с управляемой в широких пределах задержкой между ними (10 нс–100 мкс), а также трех систем сбора рассеянного излучения по длине установки с возможностью одновременного использования двух из них.
2. Разработка и создание диагностик малоуглового лазерного рассеяния, спектрометрии, многоракурсной фотографии и быстрой пирометрии для определения механизмов эрозии поверхности мишени с образованием микрочастиц при мощном импульсном тепловом воздействии.
3. Разработка методик обработки сигналов и их реализация в виде программного кода на высокоуровневом языке с учётом особенностей диагностических комплексов.
4. Проведение исследований с помощью созданных диагностик.

Научная новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в:

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 о механизмах 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, многоракурсной 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.

Теоретическая и практическая значимость

Значимость диссертационного исследования состоит в том, что:

1. Результаты измерений электронной плотности и температуры при нагреве плазмы релятивистским электронным пучком позволили установить, что в плазме существуют быстрые флуктуации плотности.
2. Созданный на установке БЕТА комплекс оптических диагностик позволяет изучать воздействие импульсных тепловых нагрузок на поверхность перспективных материалов **во время и сразу после воздействия.**

3. Полученные экспериментальные данные о размерах, скоростях и местах рождения микрочастиц позволяют подтвердить механизм вскипания приповерхностного слоя при мощной тепловой нагрузке.

Методология и методы исследования

В исследовании широко применялись экспериментальные методы, в частности, невозмущающие оптические методы диагностики; методы теоретического и численного моделирования; методы сопоставления расчетов с экспериментальными данными.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Система томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3 позволяет проводить измерения температуры и плотности электронной компоненты плазмы 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.
2. При инъекции релятивистского электронного пучка в плазму на установке ГОЛ-3 методом томсоновского рассеяния зарегистрированы флуктуации плотности на уровне 30% от средней величины с поперечным размером не более 20 мм, нарастающие за время не более 80 нс, и измерена динамика неравновесной функции распределения электронной компоненты.
3. Диагностический комплекс, созданный на установке БЕТА и состоящий из системы малоуглового лазерного рассеяния, спектроскопии с пространственным разрешением, трехкадровой фотографии и быстрой пирометрии в ближнем ИК диапазоне, позволяет получать информацию о скоростях, траекториях, размерах и местах рождения микрочастиц, а также определять распределение температуры поверхности и ее динамику в отдельной заданной точке.
4. Вылет микрочастиц вольфрама происходит с поверхности, подвергнутой мощной импульсной тепловой нагрузке, после окончания электронного пучка, что соответствует модели вскипания расплавленного слоя при ударном квазистационарном тепловом воздействии.
5. При удельных тепловых нагрузках до 3 порогов плавления, микрочастицы преимущественно рождаются в областях, где находятся подповерхностные трещины (параллельные поверхности). Характерный размер частиц лежит в диапазоне 2–10 мкм, их скорости могут достигать 100–250 м/с, при этом существует обратная зависимость между скоростью и размером частицы.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность обеспечивается большим объемом экспериментальных данных, полученных с различных независимых диагностик. Результаты

хорошо воспроизводимы, непротиворечивы 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.

Материалы диссертационного исследования многократно обсуждались на семинарах ИЯФ СО РАН, а также были представлены в виде 12 докладов на 3 российских и 9 международных конференциях: XXXIX Международная Звенигородская конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2012; XLI Международная Звенигородская конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2014; International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, Daejeon, Republic of Korea, 2014; Международная конференции «Современные средства диагностики плазмы и их применение» г. Москва, Россия, 2014; Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» г. Звенигород, Россия, 2015; International Workshop on Plasma Material Interaction Facilities for Fusion Research, Jülich, Germany, 2015; International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, г. Новосибирск, Россия, 2016; International Conference on Plasma-Facing Materials and Components for Fusion Applications, Neuss/Düsseldorf, Germany, 2017; XLVI Международная Звенигородская конференции по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, Россия, 2019; International Conference on Fusion Reactor Materials, La Jolla, CA, USA, 2019; Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» г. Сочи, Россия, 2021; Всероссийская конференция «Диагностика высокотемпературной плазмы» г. Сочи, Россия, 2023;

Публикации

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.

Личный вклад

Вклад автора в получении научных результатов, лежащих в основе диссертационного исследования, является определяющим. Все результаты по теме исследования получены автором лично. Автор внес ключевой вклад в развитие системы томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3, создании установки БЕТА и её диагностического комплекса. Автором осуществлялось планирование и моделирование экспериментов, их подготовка и проведение, обработка и анализ экспериментальных данных.

Подготовка результатов к публикации в научных журналах проводилась совместно с соавторами. Список публикаций содержит 4 работы.

Вклад соискателя в статью [1] заключается в непосредственном создании двухимпульсного лазерного генератора и узлов сбора рассеянного излучения, настройка системы усилителей и системы регистрации, проведении экспериментов и обработке данных, полученных диагностикой. В данной работе проведено исследование динамики функции распределения электронов и переноса тепла в системе электронный пучок–плазма.

Вклад автора в статью [2] состоял в подготовке эксперимента, перестройке диагностического комплекса под нужды экспериментальной кампании, проведении эксперимента и анализе данных. Для диагностики томсоновского рассеяния был разработан программный комплекс, позволяющий ускорить обработку и получать результаты измерений сразу после эксперимента. В ходе данной работы были зарегистрированы быстрые (~ 100 нс) изменения электронной плотности плазмы.

В статье [3] автором произведено моделирование системы диагностики лазерного рассеяния и её сборка. Все экспериментальные данные, представленные в данной работе, получены и обработаны автором лично. В статье показано, что диагностика малоуглового рассеяния позволяет измерять размер микрочастиц и их динамику в области занятой лазерным пучком.

Вклад автора в статью [4] состоял в моделировании и сборке трехракурсной системы быстрой фотографии, а также в обработке экспериментальных данных, относящихся к диагностике. Важным выводом данного исследования, установленным автором экспериментально, является факт первоначального вылета микрочастиц именно из зон расплава, образующегося над поверхностными трещинами.

Структура и объем диссертации

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.

Основное содержание работы

Во введении приводится краткое описание проблем на пути превращения экспериментальных машин для удержания плазмы в термоядерные реакторы, обоснована актуальность темы, дана характеристика её степени проработанности, определена цель и сформулированы задачи диссертационного исследования, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, а также представлены положения выносимые на защиту.

В первой главе представлена двухимпульсная система томсоновского рассеяния, работавшая на установке ГОЛ-3 в различных модификациях, и результаты её работы. В самом начале первой главы кратко изложены

общие физические принципы, лежащие в основе метода томсоновского рассеяния, рассмотрены области его применимости.

Рассматриваемая в главе установка ГОЛ-3 — длинная импульсная открытая ловушка, состоящая из 55 элементарных пробкотронов. Нагрев удерживаемой плазмы осуществляется электронными пучками различной длительности с одной из сторон ловушки. Особенности установки предъявляют ряд требований на систему диагностики томсоновского рассеяния: измерение электронной плотности и температуры плазмы необходимо проводить в несколько моментов времени, с высоким временным разрешением 100 нс – 10 мкс, а кроме того, необходимо измерять радиальный профиль в нескольких точках по длине установки (в различных пробкотронах) с высоким пространственным разрешением.

Для измерения параметров плазмы с высоким временным разрешением из двух независимых задающих генераторов и каскада усилителей был создан диагностический лазер. Данная схема позволяла получать два лазерных импульса с произвольным временем задержки между ними 80 нс – 100 мкс, а вариация мощности накачки активных сред позволяла поддерживать энергии в импульсах примерно равной. Второй важной особенностью диагностического комплекса является то, что вдоль оси плазменного шнура было создано три узла сбора рассеянного излучения. Подробнее расположение узлов сбора представлено на рисунке 1. Повторное использование лазерного луча с помощью поворотных зеркал сделало возможным одновременную работу двух узлов.

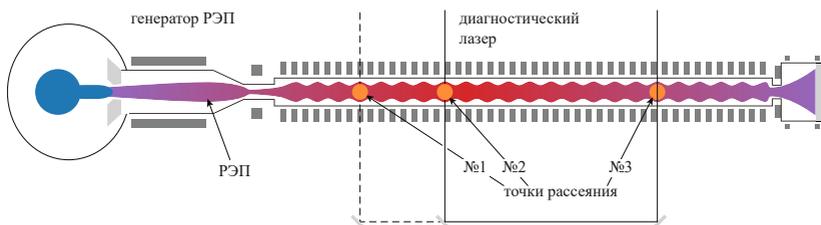


Рисунок 1 — Схема расположения узлов рассеяния на установке ГОЛ-3

Для обработки экспериментальных данных в режиме, приближенном к реальному времени, был создан программный комплекс на высокоуровневом языке Python 3. В возможности комплекса входили такие элементы, как автоматический поиск пиков детектором на основе вейвлет преобразования, учёт релейских калибровок и паразитного сигнала рассеяния. Получение параметров плазмы сразу после импульса работы установки, позволяло вносить изменения в планы экспериментальной кампании.

Созданная диагностика томсоновского рассеяния проводила измерения в различных режимах работы установки ГОЛ-3. В экспериментах по

инжекции релятивистского электронного пучка в плазму проводились измерения профиля плотности с 80 нс задержкой между импульсами. На рисунках 2 и 3 представлены типичные профили плотности в двух режимах. На рисунке 3 в двух пространственных каналах регистрации присутствуют статистически значимые различия, что может говорить о нелинейных процессах в плазме, в частности, сильной ленгмюровской турбулентности.

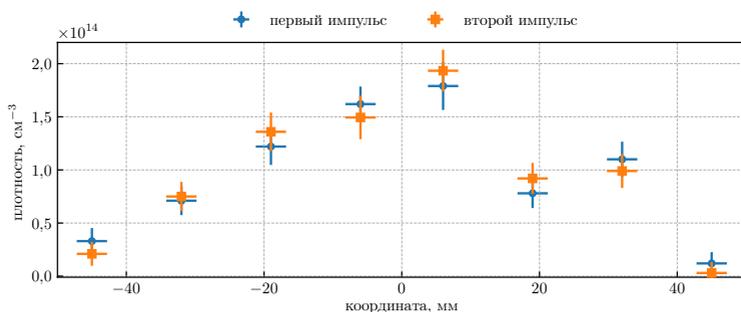


Рисунок 2 — Экспериментальный профиль плотности плазмы без быстрых флуктуаций

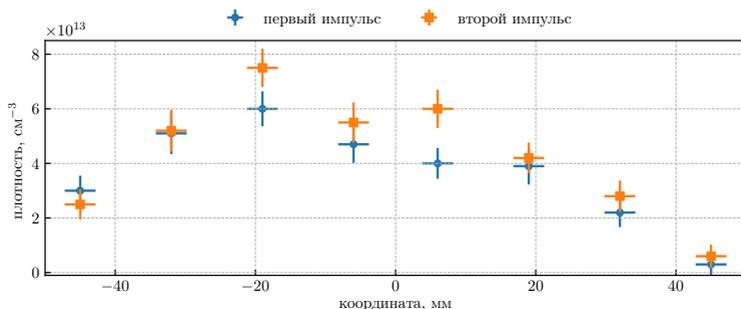


Рисунок 3 — Экспериментальный профиль плотности плазмы с быстрыми флуктуациями. В двух точках вдоль диаметра плазменного столба наблюдаются статистически значимые различия в плотности плазмы (3 и 5 точка)

Также эта система использовалась для измерения динамики температуры электронной компоненты. Было установлено, что средняя энергия в центре плазменного шнура уменьшается почти на порядок в пределах

2,5 мкс, а электронная функция распределения значительно отклоняется от максвелловской.

В экспериментах по нагреву плазмы 100 кэВ электронным пучком определялась динамика температуры и плотности электронной компоненты. Данный источник пучка также использовался в экспериментах по генерации миллиметрового и субмиллиметрового излучения при инжекции электронного пучка в газ.

В заключении первой главы изложены основные достигнутые результаты и возможные варианты дальнейшего развития системы томсоновского рассеяния в длинных открытых ловушках. Показано, что созданная система диагностики позволяет определять параметры электронной компоненты в двух точках рассеяния по длине в два момента времени за один цикл работы установки, что крайне важно в условиях турбулентной плазмы открытых ловушек. Диагностика профиля плотности и температуры плазмы, а также динамики этих величин может проводиться с высоким временным и пространственным разрешением.

Во **второй главе** обсуждается установка БЕТА — стенд для изучения эрозии материалов под воздействием мощных импульсных тепловых нагрузок, комплекс пассивных оптических диагностик для изучения механизмов эрозии и полученные с помощью них результаты.

В разделе 2.1 представлено описание установки БЕТА — экспериментального стенда для изучения взаимодействия мощных импульсных тепловых нагрузок с материалами. Экспериментальная установка состоит из генератора электронного пучка, вакуумной камеры, магнитной системы транспортировки пучка, системы откачки, набора оптических диагностик и подвижного держателя мишеней. Схема установки БЕТА представлена на рисунке 4.

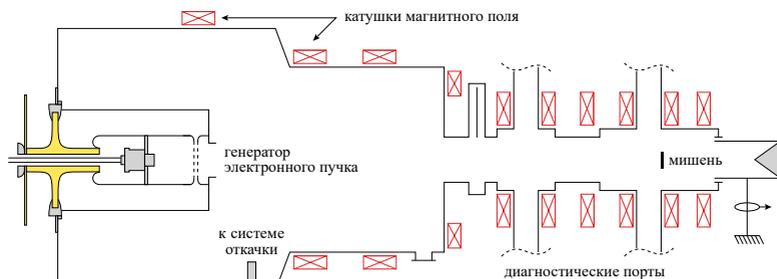


Рисунок 4 — Схема установки БЕТА

Раздел 2.2 посвящен обсуждению особенностей электронного пучка в качестве источника импульсной тепловой нагрузки. Показано, что использование электронной пушки имеет ряд преимуществ. Интенсивность

фонового свечения создаваемого электронным пучком значительно меньше, чем плазмы в различных КСПУ установках, что делает возможным исследование процессов эрозии непосредственно в ходе теплового воздействия и сразу после него.

В разделе 2.3 представлены результаты экспериментов с использованием 100 кэВ электронного пучка в экспериментах по изучению механизмов эрозии, показано, что пучок позволяет создавать тепловые нагрузки в широком диапазоне параметров, в том числе способные производить растрескивание и оплавления поверхности образцов.

Раздел 2.4 посвящен определению параметров абляционного факела. Представлены данные полученные со спектроскопической диагностики с пространственным разрешением и диагностики интенсивности свечения, которые позволили оценить температуру паров и развиваемое ими давление. При анализе экспериментальных данных, на сигналах, соответствующих различным пространственным каналам, были обнаружены скоррелированные пики. Исходя из расстояния между каналами и времени задержки была вычислена скорость расширения плотных областей абляционного факела, что в свою очередь, позволило произвести оценки температуры.

В разделе 2.5 описана система многокадровой быстрой фотографии, созданная для определения параметров потока микрочастиц. Наблюдения, представленные на рисунке 5, показывают, что скорость микрочастиц и удаление от поверхности линейно связаны. В свою очередь это позволило установить, что вылет микрочастиц происходит практически одновременно, сразу после окончания импульса теплового воздействия. Кроме этого, как показано на рисунках 6, 7 и 8, рождение микрочастиц из расплавленного слоя первоначально происходит из областей связанных с трещинами.

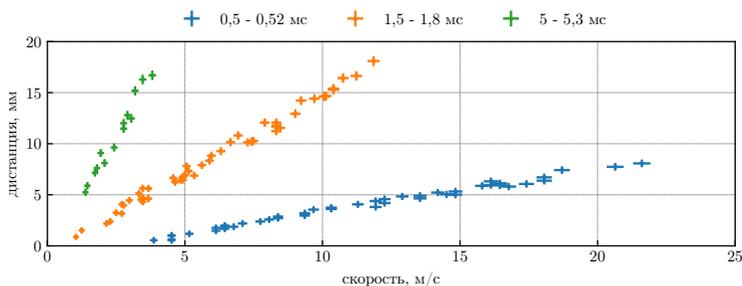


Рисунок 5 — Зависимость скорости частиц от расстояния до поверхности

В разделе 2.6 обсуждается система пирометрии в ближнем ИК диапазоне с пространственным и временным разрешением, а также результаты

её работы. Как было установлено ранее, трещины на поверхности играют важную роль в появлении микрочастиц.

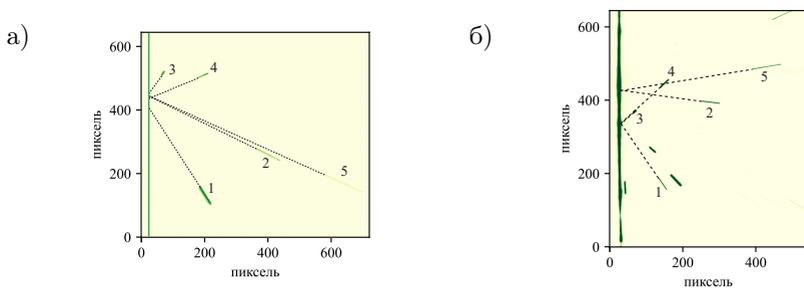


Рисунок 6 — Изображение облака микрочастиц:
а) ракурс 1, б) ракурс 2

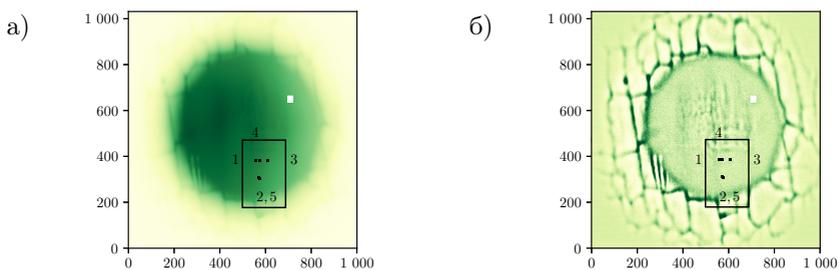


Рисунок 7 — Изображение поверхности во время теплового воздействия:
а) ракурс 3, исходное изображение, б) выделена сеть трещин

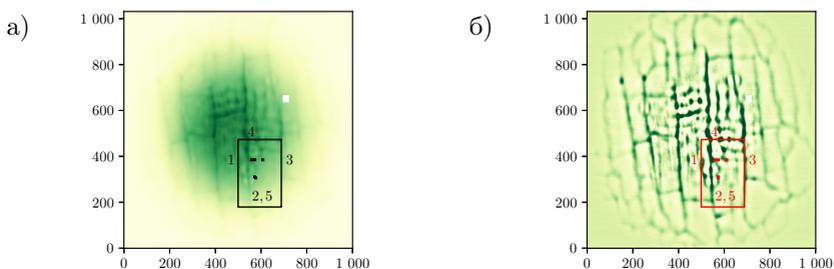


Рисунок 8 — Изображение поверхности после теплового воздействия:
а) ракурс 3, исходное изображение, б) выделена сеть трещин

Растрескивание было обнаружено в большом количестве экспериментов, и что самое важное, трещины могут образовываться при нагрузках значительно ниже порога плавления. Для исследования процессов разрушения крайне важно определять распределение температуры поверхности и её временную динамику

При температурах 700–2000 К максимальная интенсивность лежит в диапазоне 1,4–4,1 мкм, что делает затруднительным регистрацию этого излучения стандартными детекторами на основе кремния. Для решения данной проблемы на установке БЕТА создан диагностический комплекс с использованием InGaAs детекторов. Использование общего объектива и светоделительного кубом позволяла в течение эксперимента получать пространственное распределение интенсивности свечения поверхности в одной точке по времени, а также её временную динамику в выбранной области на поверхности образца. Диагностика пирометрии позволила серьёзно расширить возможности установки в целях изучения механизмов эрозии до порога плавления, в частности, образования трещин. Измерения температуры с высоким пространственным и временным разрешением проводились в экспериментах по определению порога образования трещин и изучению изгиба образца.

В **третьей главе** обсуждается система диагностики микрочастиц методом малоуглового лазерного рассеяния. Во второй главе был определен ряд параметров потока микрочастиц, но их размер так и не был измерен, откуда следует основная цель данной диагностики — определение размера рождающихся частиц.

В разделе 3.1 обсуждается проблема микрочастиц в вакуумных объёмах систем магнитного удержания плазмы и обосновывается важность определения их размера. Раздел 3.2 посвящен теоретическому рассмотрению рассеянию лазерного излучения микрочастицами. Раздел 3.3 описывает разработку системы малоуглового лазерного рассеяния, а раздел 3.4 непосредственному созданию диагностики на установке БЕТА.

В качестве диагностического лазера использовался непрерывный твердотельный неодимовый лазер, работающий на второй гармонике, мощностью 1 Вт. Расстояние от поверхности мишени до лазерного луча могло варьироваться в пределах 4–11 мм. Для подавления яркого свечения абляционного факела использовались узкополосные фильтры с характерной спектральной шириной 1 нм, а для борьбы с рассеянным на элементах установки диагностическим излучением входное окно было отнесено от мишени на вакуумном патрубке, а в самом патрубке был установлен ряд диафрагм. В силу ограниченного количества каналов регистрации данная диагностика наблюдала рассеянное излучение только в трех различных угловых диапазонах. Осциллограммы сигналов рассеянного излучения в двойной логарифмической шкале представлены на рисунке 9.

Детальный анализ экспериментальных данных проведенный в разделе 3.5 позволил не только определить размер микрочастиц в потоке, но и параметры самого потока, для этого система малоуглового лазерного рассеяния была абсолютно прокалибрована с помощью пластинки из матового стекла. Предварительно характеристики матовой пластинки были измерены с помощью гониометра и калиброванного детектора на основе PIN-диода. Экспериментальные данные показывают, что в лазерном луче присутствуют микрочастицы 2–10 мкм, а отношения между различными угловыми каналами зависит от времени, что может быть объяснено изменением размера частиц присутствующих в лазерном луче. Важным результатом работы диагностики стало то, что была обнаружена обратная связь между размером и скоростью микрочастицы, кроме того, было определено количество уносимого материала за один импульс работы установки.

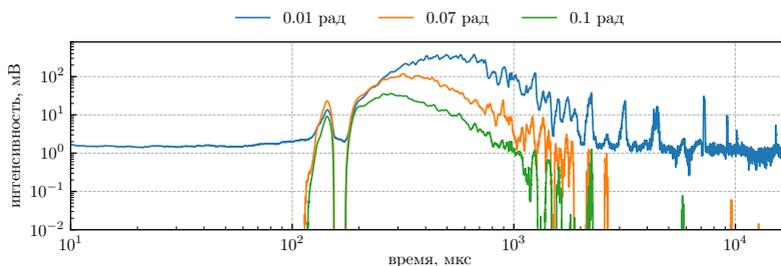


Рисунок 9 — Сигналы рассеяния. Временная динамика зависит от угла наблюдения

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы и перспективы дальнейшего развития данной тематики.

Заключение

Основной целью диссертационной работы являлось развитие системы томсоновского рассеяния на установке ГОЛ-3 для изучения механизмов взаимодействия электронного пучка с плазмой, а также комплекса оптических диагностик на установке БЕТА для изучения процессов разрушения обращенных в плазму материалов. В качестве основных результатов диссертационной работы можно выделить следующее:

1. На установке ГОЛ-3 была создана двумпульсная диагностика томсоновского рассеяния. Система способна проводить измерения измерения профиля плотности и температуры плазмы в два момента времени в течении одного рабочего импульса установки в

- нескольких точках по её длине, что позволяет исследовать быстрые и пространственно локализованные процессы в плазме;
2. В различных режимах работы установки ГОЛ-3 измерены параметры плазмы с высоким временным и пространственным разрешением. Установлено, что при инжекции мощного релятивистского электронного пучка в плазму, в ней возникают быстрые флуктуации плотности электронной компоненты;
 3. На установке ВЕТА спроектирован и введен в эксплуатацию обширный комплекс оптических *in situ* диагностик 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 временным и пространственным разрешением.

Большая часть работы посвящена созданию диагностик для изучения процессов эрозии, что позволило получить значительное количество информации о механизмах разрушения. В серии экспериментов с мощной импульсной тепловой нагрузкой $100 - 300 \text{ МДж}/(\text{м}^2\text{с}^{0,5})$ показано, что:

1. Вылет микрочастиц происходит практически одновременно, сразу после окончания импульса теплового воздействия, при этом скорости микрочастиц могут достигать $250 - 350 \text{ м/с}$, а их характерный размер лежит в диапазоне $2 - 10 \text{ мкм}$.
2. определен вид зависимости между размером микрочастиц и их скоростью.
3. Генерация микрочастиц первоначально происходит из областей с повышенной температурой поверхности. Данные участки соответствуют слабосвязанным зернам и краям перпендикулярных трещин, которые имеют подавленную теплопроводность из-за параллельных поверхности трещин.
4. Существуют группы связанных частиц, которые вылетают с одной области поверхности практически одновременно.
5. Зарегистрировано существенное увеличение интенсивности генерации микрочастиц при $F_{h,f} > 175 - 200 \text{ МДж}/(\text{м}^2\text{с}^{0,5})$.

Измеренная в экспериментах максимальная скорость разлёта микрочастиц значительно превосходит скорости, ранее зарегистрированные в экспериментах на различных КСПУ установках. Это может быть объяснено тем, что быстрыми являются мелкие частицы, которые сложно наблюдать с помощью камер видимого диапазона при мощном фоновом излучении воздействующей плазмы. Стоит отметить, что эти объяснения было бы невозможно верифицировать без регистрация излучения непрерывного лазера рассеянного на малый угол, что является хорошим примером синергетического эффекта двух диагностик.

При нагрузках менее $50 \text{ МДж}/(\text{м}^2\text{с}^{0,5})$ образование сплошного расплавленного слоя на поверхности вольфрама не происходит. Однако, при наличии на поверхности слабосвязанных областей с подавленной теплопроводностью, они могут оплаиваться и генерировать микрочастицы.

Большая часть данных хорошо согласуется с результатами полученными другими авторами, однако, часть является уникальными. Данные диагностики могут быть использованы для исследования и других перспективных материалов первой стенки и дивертора, в том числе и не металлических, например керамик, в частности B_4C и SiC .

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Upgrading of Thomson scattering system for measurements of spatial dynamics of plasma heating in GOL-3 / S. S. Popov, L. N. Vyacheslavov, ... A. A. Kasatov, ... [et al.]. — Текст : электронный // Fusion Science and Technology. — 2011. — Vol. 59, nr 1T. — P. 292–294. — URL: <https://doi.org/10.13182/FST11-A11639>. — Дата публикации: 10.08.2017.
2. Two-pulse Thomson scattering system for measurements of fast fluctuations of electron density in multimirror trap GOL-3 / S. S. Popov, A. V. Burdakov, ... A. A. Kasatov, ... [et al.]. — Текст : электронный // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2013. — Vol. 720. — P. 39–41. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2012.12.040>. — Дата публикации: 21.08.2013.
3. Observation of dust particles ejected from the tungsten surface by transient heat flux with small-angle scattering of cw laser light / L. N. Vyacheslavov, A. S. Arakcheev, ... A. A. Kasatov, ... [et al.]. — Текст : электронный // Nuclear Materials and Energy. — 2017. — Vol. 12. — P. 494–498. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.nme.2017.01.023>. — Дата публикации: 21.10.2017.
4. Diagnostics of the dynamics of material damage by thermal shocks with the intensity possible in the ITER divertor / L. N. Vyacheslavov, A. S. Arakcheev, ... A. A. Kasatov, ... [et al.]. — Текст : электронный // Physica Scripta. — 2018. — Т. 93, nr 3. — URL: <https://doi.org/10.1088/1402-4896/aaa119>. — Дата публикации: 19.02.2018.

Касатов Александр Александрович

Исследования плазмы и обращённых к плазме материалов с помощью оптических *in situ* диагностик

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 16.07.2025.

Подписано в печать 17.07.2025.

Формат 60×90 1/16 Объем 1.0 печ.л., 0.9 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Обработано на IBM PC и отпечатано на ротапринте ИЯФ СО РАН
630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 11