

На правах рукописи



Пинженин Егор Игоревич

**Применение методов ядерной физики для диагностики
быстрых частиц на установке ГДЛ**

1.3.9. Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск — 2026

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

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ — кандидат физико-математических наук, Максимов Владимир Васильевич

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Будаев Вячеслав Петрович — доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение "Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", руководитель отделения

Немцев Григорий Евгеньевич — кандидат физико-математических наук, Частное учреждение Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР», начальник сектора

ВЕДУЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Защита диссертации состоится «2» июля 2026 г. в 14 ч. 30 мин. 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 «13» мая 2026 г.

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



Лотов Константин
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Установка Газодинамическая ловушка (ГДЛ) имеет линейную осесимметричную конфигурацию открытого типа, предназначенную для удержания плазмы с субтермоядерными параметрами. Исследовательская программа ГДЛ ориентирована на решение ключевых физических проблем и отработку технологий, необходимых для реализации термоядерных приложений газодинамической ловушки. К таким возможным приложениям относятся мощные источники нейтронов для решения задач ядерного и термоядерного материаловедения, производства редких изотопов, переработки отработанного ядерного топлива, а также управления реакторами деления, работающими в подкритическом режиме. Полученные результаты экспериментальных и теоретических работ по программе исследований в области магнитных ловушек открытого типа позволяют также с оптимизмом оценивать перспективность создания "чистого" термоядерного реактора для производства энергии на основе ГДЛ.

Одной из ключевых особенностей ГДЛ является наличие популяции горячих ионов с максимальной энергией в 25 кэВ и средней энергией около 10 кэВ. Горячие ионы возникают в результате ионизации и захвата мощных пучков атомарного дейтерия удерживаемой в ловушке теплой дейтериевой плазмой. Горячие ионы сталкиваются между собой и с ионами теплой плазмы, что приводит к реакции синтеза ядер дейтерия. В результате реакции синтеза возникают протоны с энергией 3.02 МэВ и нейтроны с энергией 2.45 МэВ (а также ${}^3\text{He}$ и T). Диагностика, основанная на регистрации этих частиц, позволила в предшествующих настоящей работе экспериментах получить богатую информацию о процессах, определяющих удержание горячих ионов. Краткий обзор результатов ранних работ по изучению удержания горячих ионов в установке ГДЛ приведен в главе 1.

Последовавшая за этим этапом исследований модернизация установки ГДЛ привела к существенному росту параметров плазмы и, как следствие, к возникновению ряда физических процессов, не наблюдавшихся ранее. Это потребовало создания и развития современных и отвечающих актуальным экспериментальным задачам диагностических методов, приведенных в настоящей работе. Диагностики позволили получать информацию об удержании быстрых частиц в новых режимах работы установки и контролировать параметры плазмы в этих режимах. Ниже перечислены этапы и основные результаты модернизаций.

- 1) Был разработан и внедрен метод вихревого удержания, позволивший минимизировать поперечные потери частиц и энергии плазмы, возникающие при развитии МГД-неустойчивостей.

2) Длительность работы атомарных инжекторов была увеличена с 1 мс до 5 мс, при этом суммарная мощность атомарных пучков, достигающих поверхности плазмы, возросла с 3.5 МВт до 5 МВт.

3) Введена в строй система дополнительного микроволнового нагрева плазмы на частоте электронного циклотронного резонанса (ЭЦР), что позволило достичь значения температуры электронов ~ 1 кэВ и продемонстрировать улучшение удержания быстрых ионов, соответствующее росту полного выхода нейтронов на 80%.

4) Разработаны и внедрены новые методы генерации предварительной плазмы, необходимые для первоначальной ионизации и захвата атомарных пучков. Один из этих методов основан на микроволновом пробое газа, предварительно инжектированного в вакуумную камеру ловушки [10]. Другой метод заключается в использовании инъекции электронного пучка в ловушку через одну из магнитных пробок. Новому методу, основанному на генерации плазмы электронным пучком, посвящен отдельный раздел настоящей работы.

Степень разработанности темы исследований. Результаты первых двух модернизаций привели к существенному росту относительного давления плазмы, что в условиях высокой степени анизотропии функции распределения горячих ионов привело к развитию микронеустойчивости, которая была идентифицирована как Альфвеновская ионно-циклотронная. Эта неустойчивость была изучена на ГДЛ как экспериментально, так и теоретически. Другой неустойчивостью была глобальная акустическая мода, вызванная анизотропным давлением. В качестве диагностических методов в этих исследованиях использовались в основном магнитные измерения. В рамках настоящей работы было решено развить диагностику, которая позволяет визуализировать плазмоды горячих ионов в свете атомов с энергией 1-25 кэВ с пространственным и временным разрешением, являясь многоканальным монитором потока таких атомов. Эти работы описаны в главе 2 настоящей работы. В качестве регистраторов здесь используются диоды с тонким мертвым слоем. Отметим, что такие диоды широко применяются в плазменном эксперименте для регистрации частиц и излучения. Дополнительно в главе 3 продемонстрировано изменение пространственного распределения продуктов термоядерной реакции, свидетельствующие о перестроении функции распределения быстрых частиц в результате развития микронеустойчивостей.

Режимы с возросшей плотностью и относительным давлением сопровождалась увеличением выхода термоядерной реакции. Для оптимизации режимов удержания плазмы по параметру нейтронного выхода было решено создать монитор потока продуктов реакции синтеза. Отметим, что регистрация продуктов реакции синтеза широко применяется на большинстве термоядерных установок. Чаще всего в таких диагностиках ведется регистрация 2.45 МэВ (продукты DD реакции) и 14 МэВ (продукты DT

реакции) нейтронов. В условиях ГДЛ целесообразно регистрировать как нейтроны, так и 3.02 МэВ протоны, были налажены измерения абсолютных значений выхода реакции синтеза дейтерия в различных экспериментальных кампаниях на ГДЛ. Эти данные приведены в главе 3.

Помимо демонстрации улучшенного удержания быстрых частиц и увеличения электронной температуры при применении СВЧ нагрева, в экспериментах на ГДЛ зарегистрировано возникновение в плазме популяции перегретых электронов и связанная с этим генерация мощных вспышек рентгеновского излучения. Жесткое рентгеновское излучение серьезно искажает показания мониторов нейтронного потока. Для изучения свойств такого излучения, учета его вклада в измерения штатными диагностиками термоядерной реакции было решено использовать спектрометр нейтронов и гамма квантов на основе стилибенового сцинтиллятора. Детекторы на основе сцинтилляторов, в которых форма световой вспышки зависит от сорта регистрируемой частицы, находят широкое применение в плазменном эксперименте. В новом приборе, который был создан в лаборатории, реализован метод частотно градиентного анализа, причем идентификация идет в режиме реального времени (этим он отличается от аналогичных приборов). Требовалось прокалибровать спектрометр и протестировать его в плазменном эксперименте. Такой спектрометр в режиме реального времени способен определять сорт зарегистрированной частицы по форме сцинтилляционной вспышки. Эти данные приведены в главе 4.

Целью настоящей работы является развитие и применение методов, основанных на регистрации продуктов реакции синтеза ядер дейтерия, нейтральных частиц с энергиями в десятки килоэлектронвольт и фотонов с энергиями в диапазоне от десятков до сотен килоэлектронвольт, которые возникают в процессах нагрева и удержания плазмы в установке Газодинамическая ловушка.

Было необходимо решить следующие **задачи**:

- Развитие диагностических методов для изучения популяции быстрых ионов, которая формируется в результате мощной атомарной инжекции в плазму ГДЛ. В качестве диагностического метода применялись многоканальные мониторы, визуализирующие плазму "в свете" быстрых атомов с энергией 1-25 кэВ. Изучение процессов, связанных с развитием магнитогидродинамических и кинетических неустойчивостей, влияющих на удержание быстрых частиц в ГДЛ.
- Создание диагностики для измерения абсолютных значений интенсивности термоядерной реакции и оптимизации удержания быстрых ионов, изучения эволюции пространственного распределения быстрых частиц по продуктам термоядерной реакции. Изучение перестроения функции распределения быстрых частиц

в результате развития микронеустойчивостей с применением методов численного моделирования для анализа и интерпретации экспериментальных данных.

- Проведение калибровок и изучение свойств спектрометра на основе стильбенового сцинтиллятора, ФЭУ и программируемой логической матрицы. Изучение популяции перегретых электронов, возникающих в результате инжекции СВЧ излучения и электронного пучка в плазму ГДЛ. Получение экспериментальных данных об энергии таких частиц по спектру рентгеновского излучения.

Научная новизна. Впервые на установке ГДЛ реализована диагностика продуктов термоядерной реакции на основе диодов, регистрирующая протоны с энергией 3.02 МэВ и позволяющая вести абсолютные измерения их потока и его пространственное распределение.

Впервые на установке ГДЛ реализована диагностика быстрых ионов на основе линеек многоэлементных диодов с тонким мертвым слоем, позволяющая наблюдать динамику плазмы методом анализа потока быстрых атомов: накопление быстрых ионов в процессе атомарной инжекции, их потери в результате развития МГД неустойчивостей, перераспределение быстрых ионов в пространстве в результате развития микронеустойчивостей.

Новый спектрометр на основе стильбена позволил впервые в условиях ГДЛ разделить при измерениях вклады рентгеновских квантов и нейтронов, а также впервые получить данные об энергии перегретых электронов, возникающих в ГДЛ в процессе электронного циклотронного нагрева плазмы и в экспериментах по инжекции электронного пучка.

Теоретическая и практическая значимость. Все описанные в работе диагностики активно используются в плазменном эксперименте на ГДЛ, научная информация активно используется при анализе экспериментов и построении теоретических моделей.

Диагностика продуктов термоядерной реакции являлась одной из важных в экспериментах по изучению СВЧ нагрева плазмы, по влиянию микронеустойчивостей на удержание горячих ионов, по изучению физики расширителя и других. Причем эксперименты по изучению влияния газовых условий в расширителе открытой ловушки на удержание плазмы в центре позволили существенно расширить диапазон рабочих параметров расширителя в проекте будущего термоядерного реактора на основе открытой ловушки. Базируясь на работах автора, команда установки MST совместно с командой установки C2U компании Tri Alpha Energy создала аналогичную диагностику, и она показала свою эффективность. При участии автора была налажена диагностика 3.02 МэВ протонов на сферическом токамаке Глобус-2М.

Диагностика потока быстрых атомов использовалась на ГДЛ для дополнительной верификации механизма вихревого удержания плазмы и теории Альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости.

Научная ценность стильбенового спектрометра в экспериментах на ГДЛ заключается в том, что впервые получены данные об энергии перегретых электронов по спектру рентгеновского излучения на установке ГДЛ, а практическая значимость заключается в том, что показана возможность одновременной регистрации спектра 2.45 МэВ и 14 МэВ нейтронов, что важно в предстоящих дейтерий-тритиевых кампаниях, например, в экспериментах на ITER. Также показано, что энергетическое разрешение прибора достаточно для измерения ионной температуры в таких экспериментах. Стилбеновый спектрометр показал возможность определить вклад нейтронов и гамма квантов в сигнал других диагностик жесткого излучения.

Методология и методы исследования. Экспериментальные исследования в работе были выполнены на установке Газодинамическая ловушка в ИЯФ СО РАН, а также на ускорительных источниках нейтронов ИНГ-07ДМ и ИНГ-07Г в АО "ГНЦ РФ ТРИНИТИ", г. Москва. Моделирование разрядов ГДЛ проводилось с помощью кода DOL. Моделирование проникновения заряженных частиц в вещество проводилось с помощью кода SRIM. Моделирование коллиматоров проводилось в программе Comsol. Модель приведенная в Главе 2 была разработана с помощью кода C++.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Диагностика на основе диодов с тонким мертвым слоем позволяет изучать процессы накопления и удержания быстрых ионов, динамику их пространственного распределения, а также МГД активность плазмы в ГДЛ.
2. Диагностика продуктов реакции синтеза на ГДЛ, состоящая из датчиков протонов, нейтронов и гамма квантов, позволяет проводить абсолютные измерения интенсивности термоядерной реакции, оптимизировать удержание плазмы по параметру нейтронного выхода.
3. В спектрометре на основе стильбенового сцинтиллятора, ФЭУ и ПЛИС реализовано разделение нейтронов и гамма квантов на основе частотно-градиентного анализа в режиме реального времени. Максимальная скорость счета при этом составляет $6.6 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$. Показана возможность одновременной регистрации 2.45 МэВ и 14 МэВ нейтронов.

Степень достоверности и апробация результатов. Материалы, изложенные в диссертации, были представлены автором на плазменных семинарах Института ядерной физики СО РАН (ИЯФ СО РАН), на семинарах лаборатории 9-1 ИЯФ СО РАН.

Материалы были представлены автором на международных конференциях:

1. XXXV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 11-15 февраля 2008 г.
2. XXXVII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 8-12 февраля 2010 г.
3. XXXVIII Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 14-18 февраля 2011 г.
4. XXXIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 6-10 февраля 2012 г.
5. XLV Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 2-6 апреля 2018 г.
6. XLVI Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 18-22 марта 2019 г.
7. XLIX Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 14-18 марта 2022 г.
8. I Международная (Звенигородская) конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, Россия, Звенигород, 20-24 марта 2023 г.
9. 8th International Conference on Open Magnetic systems for plasma confinement, Россия, Новосибирск, 5-9 июля 2010 г.
10. 11th International Conference on Open Magnetic systems for plasma confinement, Россия, Новосибирск, 8-12 августа 2016 г.
11. 12th International Conference on Open Magnetic systems for plasma confinement, Япония, Тсукуба, 27-31 августа 2018 г.
12. 3rd European Conference on Plasma Diagnostics, Португалия, Лиссабон, 6-9 мая 2019 г.
13. 3rd International Fusion and Plasma Conference (iFPC 2024), Корея, Сеул, 24-28 июня 2024 г.
14. 4rd International Fusion and Plasma Conference (iFPC 2025), Корея, Тэджон, 9-13 июня 2025 г.

Материалы были представлены на Всероссийских конференциях:

1. XVII Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы, Россия, Звенигород, 13-17 июня 2017 г.
2. XVIII Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы, Россия, Красная Пахра, 11-15 сентября 2019 г.

3. XIX Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы, Россия, Сочи, 18-22 сентября 2023 г.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 5 печатных и электронных изданиях, из них 4 изданы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК [1, 2, 3, 4]. Одна статья издана в сборнике докладов научных конференций.

Личный вклад. Изложенные в работе результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии. Автор лично разрабатывал диагностики, описанные в главах 2 и 3, налаживал их работу в плазменном эксперименте на ГДЛ. Принимал участие в планировании и подготовке и проведении экспериментов, описанных во 2, 3 и 4 главах настоящей работы; обработке и анализе экспериментальных данных. Автор лично разработал теоретическую модель, приведенную во второй главе. Для анализа экспериментов 3 главы моделировал разряды ГДЛ кодом DOL. Автор полностью лично планировал и проводил все приведенные исследования свойств и параметров стильбенового спектрометра, приведенные в главе 4. Вклад соискателя в опубликованные работы по теме диссертации является определяющим.

Авторский вклад соискателя в статье [1] заключается в разработке и создании детекторов, описанных в статье, проведении экспериментов, обработке и анализе результатов. В работе показана возможность проведения измерения абсолютного значения потока 3.02 МэВ протонов диодными детекторами. Авторский вклад в статье [2] заключается в том, что автором были исследованы свойства лавинных диодов, а именно измерена чувствительность и показано лавинное усиление при регистрации как оптического излучения так и частиц. Автором были разработаны камеры-обскуры для регистрации атомов, покидающих плазму ГДЛ. Проведены измерения поперечных распределений, асимметрия которых наблюдается вследствие ларморовского вращения быстрых частиц в ГДЛ. Показано, что сигнал с таких детекторов определяется быстрыми частицами, которые теряются из плазмы ГДЛ. Авторский вклад в статье [3] заключается в проведении калибровок нейтронного и гамма каналов стильбенового спектрометра. Авторский вклад в статье [4] заключается в создании и отладке многоканальной системы диагностик продуктов термоядерной реакции на установке ГДЛ, а также ее тестировании в плазменных экспериментах, получению сведений о пикировке быстрых частиц вблизи точки остановки. Дополнительно соискателем в статье показано, что спектр нейтронов соответствует энергии 2.45 МэВ .

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Полный объем диссертации составляет 150 страниц, включая 86 рисунков и 8 таблиц. Список литературы содержит 112 наименований.

Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность настоящей работы, обсуждается степень разработанности темы исследований. Сформулированы цели и задачи, которые ставились в процессе работы.

Первая глава посвящена описанию установки Газодинамическая ловушка. Схема установки ГДЛ приведена на рисунке 1. Основные параметры установки приведены в таблице 1. В главе описаны типичные сценарии эксперимента, изложены сведения о базовой физике удержания мишенной плазмы в установке ГДЛ. Приведен обзор исследований быстрой компоненты в экспериментах с длительностью инжекции 1 мс. Коротко описаны результаты экспериментов по измерению пространственного распределения плотности быстрых ионов. В этих экспериментах, в частности, использовались энергоанализаторы атомов, покидающих плазму, диагностика на основе динамического эффекта Штарка, детекторы термоядерных протонов на основе сцинтилляторов и ФЭУ.

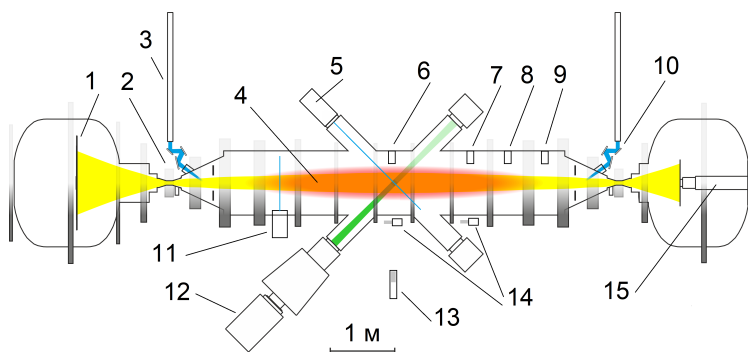


Рисунок 1 — Установка Газодинамическая ловушка. 1 - приемник плазмы, 2 - пробочный узел, 3 - линия ЭЦР нагрева, 4 - быстрые ионы, 5 - камера обскура на основе диодов AXUV, 6, 7, 8, 9 - детекторы 3 МэВ протонов, 10 - СВЧ - пучок, 11 - камера обскура на основе APD диодов, 12 - нагревной инжектор, 13 - стильбеновый спектрометр, 14 - сцинтилляционные детекторы нейтронов и гамма квантов, 15 - дуговой генератор плазмы (в некоторых экспериментальных кампаниях на это место устанавливалась электронная пушка)

Вторая глава посвящена созданию многоканальной дагностики быстрых атомов, покидающих плазму ГДЛ. Здесь приведен обзор использования диодов с тонким мертвым слоем для регистрации частиц и

излучения в плазменных экспериментах, показано, что они широко применяются в качестве быстрых болометров, для регистрации радиационных потерь, для изучения удержания быстрых ионов в плазменных установках.

Таблица 1 — Параметры установки ГДЛ

Параметр	Значение
Общая длина системы	14 м
Расстояние между пробками	7 м
Магнитное поле в центральной плоскости	до 0.35 Тл
Магнитное поле в пробке	до 12 Тл
Плотность плазмы	$(0.1-5) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Радиус плазмы в центральном сечении	17 см
Температура электронов	до 0.25 кэВ
с дополнительным СВЧ нагревом	до 1 кэВ
Длительность работы нагревных инжекторов	5 мс
Мощность нейтральной инжекции	до 5.4 МВт
Энергия нейтральных атомов	22-25 кэВ
Плотность быстрых ионов вблизи точки остановки	$\sim 5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$
Средняя энергия быстрых ионов	$\sim 10 \text{ кэВ}$
Максимальное локальное значение β	0.6
Частота гиротронов	54.5 ГГц
Мощность СВЧ нагрева	до 0.8 МВт

В условиях ГДЛ, которые характеризуются присутствием быстрой анизотропной плазменной компоненты, диагностика атомов, покидающих плазму, обладает рядом особенностей. Ионы в течение всего плазменного разряда теряют энергию в столкновениях с электронами. При этом сохраняют угловой разброс близкий к начальному (начальный угловой разброс определяется геометрической фокусировкой нагревных пучков). Поэтому при наблюдении детекторами, установленными вблизи центральной плоскости ГДЛ, атомы покидают плазму преимущественно под углом 45 градусов. Другой особенностью установки ГДЛ является то, что радиус плазмы сравним с лармеровским радиусом быстрого иона, поэтому наблюдается смещенный к периферии пик интенсивности на поперечном распределении (рисунок 2).

В рамках настоящей работы были созданы две камеры обскуры (маркеры 5 и 11 на рисунке 1). Первая установлена вблизи точки остановки быстрых ионов и регистрирует атомы, покидающие плазму под углом ~ 90 градусов. Вторая расположена вблизи центральной плоскости для наблюдения плазмы под углом 45 градусов. Эксперименты показали, что

сигналы камер определяются, главным образом, потоком атомов, покидающих плазму при перезарядке быстрых ионов. В качестве регистрирующих элементов в детекторах использовались как коммерчески доступные диоды AXUV16ELG (16 диодов в одном корпусе), так и экспериментальные диоды, которые были специально разработаны для регистрации частиц кэВного диапазона Институтом физики полупроводников СО РАН.

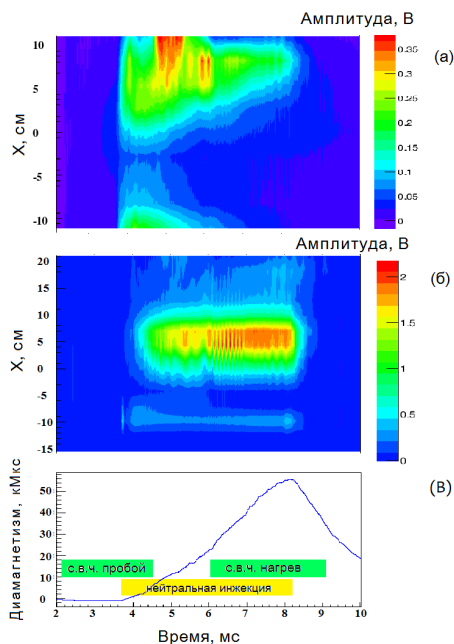


Рисунок 2 — Сигнал: а - с камеры-обскуры на основе линейки экспериментальных диодов вблизи точки остановки; б - с камеры-обскуры на основе диодов AXUV в центре ГДЛ; в - диамагнетизм плазмы. Дополнительно на графике приведены времена работы: гиротрона, создающего плазму, атомарных инжекторов и нагревного гиротрона

Экспериментальные многоканальные диоды, разработанные ИФП СО РАН, были протестированы в режиме работы с лавинным усилением при регистрации оптического излучения и частиц с энергией от нескольких килоэлектронвольт. Коэффициенты усиления при регистрации оптического излучения и частиц совпадают. Проведено сравнение чувствительности экспериментальных диодов и диодов AXUV HE1 при облучении пучками протонов с энергией 2-12 кэВ (в режимах без лавинного усиления). В режиме с лавинным усилением чувствительность таких диодов повышается, и

они могут применяться в диагностиках атомов перезарядки при регистрации сигналов малой интенсивности.

С помощью разработанной диагностики, в экспериментах на ГДЛ наблюдали накопление быстрых частиц в процессе нагрева плазмы мощными атомарными пучками, регистрировали МГД активность плазмы в ГДЛ. В приведенном на рисунке 2 эксперименте, в 3.8 мс, с началом работы нагретых инжекторов нейтральных атомов, наблюдается накопление популяции быстрых атомов. В 6 мс наблюдалась модуляция интенсивности потока быстрых частиц с частотой ~ 10 кГц, соответствующей частоте дифференциального вращения плазмы. Такая же частота наблюдалась на магнитных зондах. В рамках настоящей работы создана модель, показывающая, что осцилляции потока перезарядных атомов соответствуют вращению плазмы.

Эксплуатация диодных линеек в течение года в плазменном эксперименте на установке ГДЛ не выявила признаков их деградации вследствие накопления дефектов в полупроводниковых структурах.

Третья глава посвящена созданию диагностики продуктов реакции синтеза дейтерия на установке ГДЛ. В начале главы приведен краткий обзор техники, которая применяется для регистрации нейтронов на современных плазменных установках. Приведены особенности таких диагностик на установке ГДЛ.

Диагностика реакции синтеза на ГДЛ включает в себя следующие, разработанные в рамках настоящей работы, подсистемы:

- детекторы нейтронов и гамма квантов, которые состоят из датчиков на основе сцинтиллятора (органического пластика СПМ-5), модуля ФЭУ с делителем Hamamatsu H2611. Регистрация ведется АЦП 12 бит 1.25 МГц. Детекторы расположены за пределами вакуумной камеры (рисунок 1, маркер 14), работают в потоковом режиме, чувствительны к нейтронам и гамма квантам и позволяют измерять интенсивность реакции синтеза (в относительных единицах) с временным разрешением несколько десятков микросекунд.
- детекторы 3.02 МэВ протонов на основе диодов с тонким мертвым слоем и чувствительной площадью от 0.5 см^2 до 1 см^2 . Входное окно детектора закрыто 10 мкм алюминиевой фольгой, которая защищает диод от оптического излучения и частиц кэВного диапазона, покидающих плазму. Диоды работают в паре со специально разработанными пред усилителями. Регистрация ведется АЦП с разрешением 12 бит и частотой дискретизации 500 МГц. Детекторы расположены внутри установки ГДЛ с переменным шагом (маркеры 6, 7, 8, 9 на рисунке 1), работают в режиме счета отдельных частиц (длительность импульса от одной частицы составляет ~ 40 нс), что позволяет вести абсолютные измерения потока продуктов

реакции синтеза с разрешением до 100 мкс, калибровать скintилляционные детекторы. При необходимости применяется коллимация, что позволяет получить пространственное разрешение до нескольких сантиметров.

На рисунке 3 приведен пример работы детектора 3.02 МэВ протонов на основе диода (0.5 см^2), установленного вблизи точки остановки быстрых частиц и детектора 2.45 МэВ нейтронов на основе скintиллятора в экспериментах с дополнительным СВЧ нагревом.

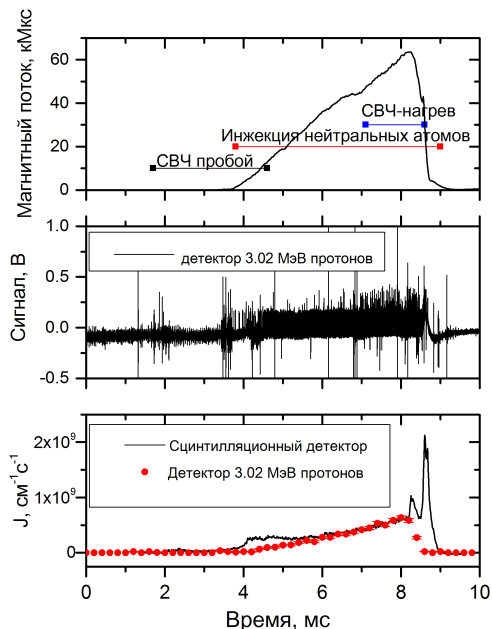


Рисунок 3 — Магнитный поток, вытесненный плазмой, дополнительно приведено время работы систем создания и нагрева плазмы (верхний график). Сигнал протонного детектора (средний график). Сигнал скintилляционного детектора (кривая) и выход термоядерной реакции, измеренный протонным детектором (точки) (нижний график). Приведен эксперимент с дополнительным СВЧ нагревом и эмиссией рентгеновского излучения

Сигнал скintилляционного детектора нормировался на протонный детектор, расположенный вблизи точки остановки быстрых ионов. В приведенном эксперименте присутствуют вспышки рентгеновского излучения с 8 мс до 9 мс. Отметим, что детектор протонов нормально работает на фоне таких вспышек, а диагностика, помимо измерения абсолютного значения

интенсивности реакции синтеза позволяет определить вклад рентгеновского излучения нейтронные измерения на ГДЛ.

В процессе настоящей работы налажен мониторинг интенсивности реакции синтеза, причем в результате модернизаций, проведенных на установке ГДЛ, наблюдался рост выхода термоядерной реакции: на порядок относительно первых экспериментов с 5 мс инъекцией. При этом количество нейтронов, которые генерирует установка возросло на два порядка относительно экспериментов с короткой инъекцией. В экспериментах с “широким” СВЧ нагревом получено увеличение выхода термоядерных нейтронов на 80% при росте диамагнетизма на 20% и электронной температуры на 44%. В экспериментах по изучению влияния газовых условий в расширителе ГДЛ показано, что деградация плазменных параметров не наблюдается вплоть до концентрации остаточного газа 10^{14} см⁻³ в расширителе, что позволяет значительно понизить требования к вакуумным системам установок следующего поколения.

В рамках представленной работы создана многоканальная система регистрации продольного профиля интенсивности термоядерной реакции на основе диодов. Помимо измерения абсолютных значений интенсивности реакции синтеза в ГДЛ, диагностика позволяет изучать эволюцию продольного профиля выхода нейтронов. Показано, что в результате развития альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости наблюдается перестроение профиля эмиссии термоядерной реакции (приведено на рисунке 4).

С помощью моделирования кодом ДОЛ показано, что изменение профиля соответствует уширению по углам функции распределения быстрых частиц и соответствует теоретическим представлениям об альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивостях. Перестроение функции распределения быстрых частиц в ГДЛ по продуктам термоядерной реакции показано впервые.

Четвертая глава посвящена изучению свойств спектрометра быстрых нейтронов и гамма квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и применению его в экспериментах на ГДЛ. В начале главы приведен обзор методов разделения нейтронов и гамма квантов по форме световой вспышки в органических сцинтилляторах. Показано, что современная техника позволяет реализовывать цифровые алгоритмы разделения в ПЛИС. При этом идентификация сорта частицы может вестись в режиме реального времени.

В лаборатории ГДЛ создан спектрометр на основе монокристаллического стильбенового сцинтиллятора, ФЭУ 9266В, АЦП 12 бит 500 МГц и ПЛИС. В приборе реализован метод разделения нейтронов и гамма квантов на основе частотно-градиентного анализа. Протестирована работа детектора при регистрации смешанного нейтронного и гамма излучения. Проведена калибровка гамма канала спектрометра с помощью

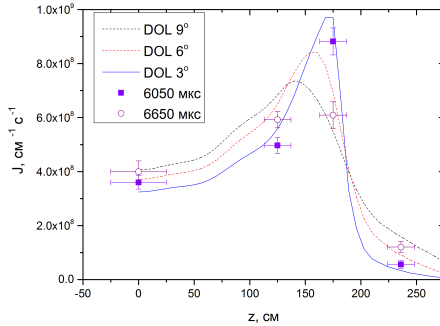


Рисунок 4 — Продольное распределение интенсивности реакции синтеза. Заполненные точки соответствуют профилю выхода DD реакции до развития неустойчивости, незаполненные точки соответствуют стационарному профилю, сформировавшемуся после развития неустойчивости. Кривыми приведен результат моделирования пространственных распределений выхода DD реакции кодом ДОЛ для различного углового разброса быстрых частиц

радионуклидных источников гамма излучения (^{137}Cs , ^{60}Co , ^{22}Na , ^{133}Ba), источников смешанного нейтронного и гамма излучения (^{252}Cf и AmBe). Данные приведены на рисунке 5, а и б.

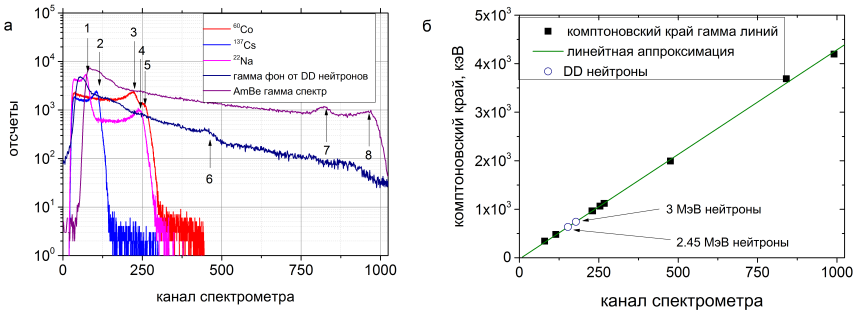


Рисунок 5 — а — спектры в гамма канале спектрометра, б — калибровочная прямая гамма канала,

Калибровка нейтронного канала спектрометра проводилась с помощью ускорительных источников DD и DT нейтронов (ИНГ-07ДМ и ИНГ-07Т соответственно). Данные приведены на рисунке 6, а и б. Энергетическое разрешение при регистрации 2.45 МэВ нейтронов составляет

180 кэВ. Энергетическое разрешение при регистрации 14.1 МэВ нейтронов составляет 380 кэВ (рисунок 7 б). Показано, что нейтрон-гамма разделение проходит в режиме реального времени, измерена зависимость эффективности идентификации нейтронов и гамма квантов в зависимости от загрузки спектрометра (рисунок 7 а, б). Показано, что эффективность разделения нейтронов и гамма квантов алгоритмом на основе частотно градиентного анализа выше, чем оптимизированного PSD метода.

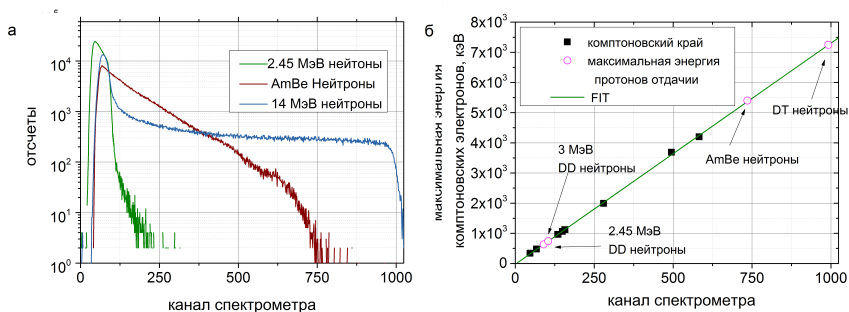


Рисунок 6 — а — спектры DD и DT нейтронов, б — калибровочная прямая нейтронного канала спектрометра

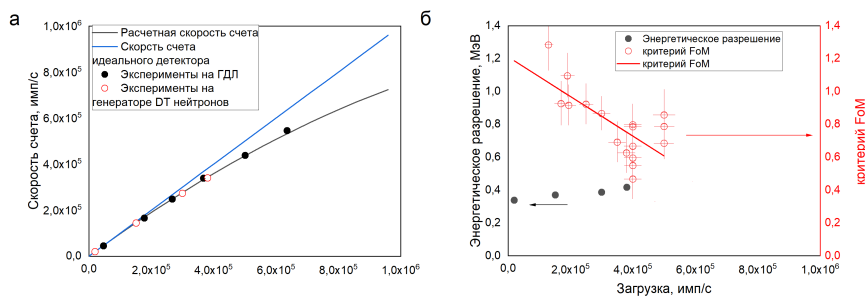


Рисунок 7 — Измерение скорости счета при различных нагрузках (а). Приведены данные, полученные в экспериментах на ГДЛ и при регистрации 14 МэВ нейтронов от нейтронного генератора. На графике (б) приведено энергетическое разрешение, полученное при регистрации 14 МэВ нейтронов и критерий FoM, измеренный при различных нагрузках в экспериментах на ГДЛ

В экспериментах с инъекцией электронного пучка вдоль ловушки и экспериментах с дополнительным СВЧ нагревом зарегистрированы вспышки рентгеновского излучения (рисунок 3, рисунок 8).

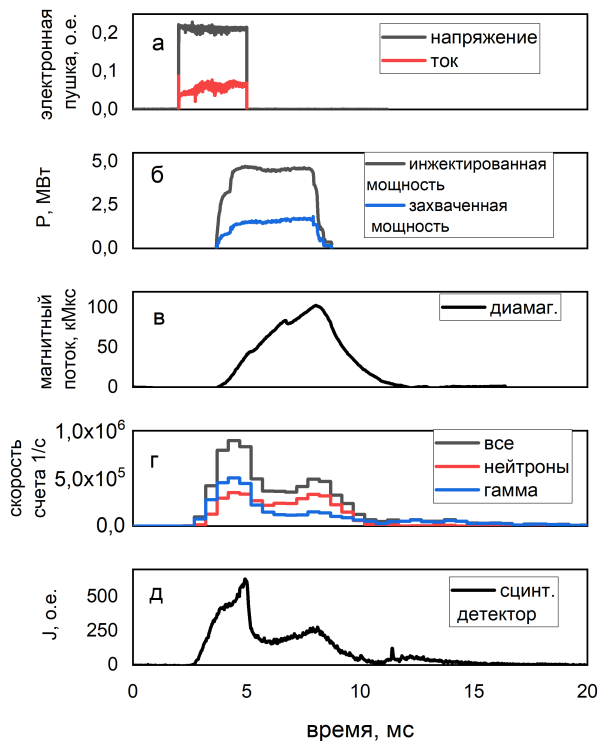


Рисунок 8 — Системы создания (а) и нагрева (б) плазмы в эксперименте с инъекцией электронного пучка вдоль ловушки, который применяется для создания предварительной плазмы. Дополнительно приведены данные с детектора нейтронов (д) и стильбенового сцинтиллятора (г)

Согласно измерениям спектра такого излучения в плазме ГДЛ возникает популяция перегретых электронов с энергией более 100 кэВ. На рисунке 8 приведен один из экспериментов на ГДЛ, в котором мишенная плазма формировалась с помощью инъекции электронного пучка (рисунок 8 а). В этом эксперименте наблюдается вспышка рентгеновского излучения, при этом скорость счета в гама канале стильбенового спектрометра

превышает скорость счета в нейтронном канале (в момент вспышки от 3.8 мс до 5 мс (рисунок 8 г, д). После окончания рентгеновской вспышки, соотношение скоростей счета в нейтронном и гамма каналах спектрометра составляет 2 к 1, что типично для плазменных разрядов без перегретых электронов. Приведенный эксперимент дополнительно демонстрирует, что электронный пучок может использоваться для генерации мишенной плазмы на ГДЛ, причем параметры стартовой плазмы в ГДЛ, которая генерируется таким способом соответствуют стандартной для дугового генератора мишенной плазме.

Заключение

В заключении приведены основные результаты работы.

На установке Газодинамическая ловушка на основе линеек диодов создана диагностика нейтральных атомов, покидающих плазму. Такая диагностика позволяет наблюдать накопление быстрых частиц, потерю таких частиц в результате МГД неустойчивости, влияние микронеустойчивостей на функцию распределения быстрых частиц. Разработана простая модель модуляции потока быстрых частиц в результате их потери в процессе вращения плазмы.

Созданы детекторы интенсивности термоядерной реакции на основе сцинтиллятора и ФЭУ, данные такого детектора нормируются на показания детектора термоядерных протонов и позволяют измерять интенсивность термоядерной реакции, в том числе, в экспериментах с дополнительным нагревом и в условиях вспышек рентгеновского излучения. Такие детекторы применяются, как один из мониторов эффективности удержания быстрых ионов плазмы.

Налажен мониторинг интенсивности реакции синтеза на ГДЛ. Зарегистрированный максимальный выход DD реакции в экспериментах на ГДЛ составляет $1.1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$. В экспериментах с СВЧ нагревом было показано увеличение выхода продуктов DD реакции с $3 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$ до $5.5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-1} \text{ с}^{-1}$; увеличение диамагнетизма плазмы на 20 %; увеличение электронной температуры до 300 эВ. В экспериментах по изучению влияния газовых условий в расширителе ГДЛ на удержание быстрых частиц в центральной ячейке показано, что расширитель может работать в широком диапазоне значений концентрации остаточного газа (от 10^{11} см^{-3} до 10^{14} см^{-3}).

Для наблюдения эволюции продольного распределения интенсивности реакции синтеза при развитии микронеустойчивостей был разработан набор датчиков термоядерных протонов, расставленных вдоль установки. Такая система позволяет изучать перестроение профиля быстрых частиц в каждом выстреле. С помощью моделирования кодом DOI показано уширение функции распределения быстрых частиц по углам в результате развития альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости.

В спектрометре нейтронов и гамма квантов на основе стильбенового сцинтиллятора, ФЭУ и ПЛИС реализован алгоритм частотно-градиентного анализа для идентификации нейтронов и гамма квантов. Спектрометр был откалиброван по радионуклидным источникам гамма квантов, по ускорительным источникам нейтронов. Показана возможность одновременной регистрации 2.45 МэВ нейтронов и 14 МэВ нейтронов. Получены данные о спектре протонов отдачи, соответствующие энергии нейтронов 2.45 МэВ на ГДЛ. Детектор используется в экспериментах со вспышками рентгеновского излучения при дополнительном СВЧ нагреве и при инжекции электронного пучка.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

В рецензируемых научных изданиях:

1. DD product yield in the GDT central cell / P. A. Bagryansky, V. V. Maximov, E. I. Pinzhenin, V. V. Prikhodko. — Текст: электронный // Fusion Science and Technology. — 2011. — Vol. 59, — Iss. 1T, — p.256-258. — URL: <https://doi.org/10.13182/FST11-A11627> (дата публикации: 10.08.2017).
 2. Пинженин, Е.И. Диодная регистрация быстрых нейтральных атомов на установке "Газодинамическая ловушка" / Е.И. Пинженин, В.В. Максимов, И.Б. Чистохин — Текст: электронный // Приборы и техника эксперимента. — 2019. — Т. 2, — с. 49-57. — URL: <https://doi.org/10.1134/S0032816219020150> (дата публикации: 25.05.2018).
 3. Development of FPGA-based real-time neutron spectrometer using stilbene scintillator / E. I. Pinzhenin, A. D. Khilchenko, P. V. Zubarev, [et al.]. — Текст: электронный // Plasma and Fusion Research. — 2019. — Vol. 14, — p.2402025. — URL: <https://doi.org/10.1585/pfr.14.2402025> (дата публикации: 02.12.2019).
 4. Пинженин, Е.И. Применение методов ядерной физики для диагностики плазмы на основе газодинамической ловушки. / Е.И. Пинженин, В.В. Максимов — Текст: электронный // Приборы и техника эксперимента. — 2024. — Т. 2, — с.53-63. — URL: <https://doi.org/10.31857/S0032816224020078> (дата публикации: 22.12.2023).
- В сборнике трудов конференций:
5. Pinzhenin, E. I. Fusion yield registration in the gas dynamic trap / E. I. Pinzhenin, V. V. Maximov — Текст: электронный // AIP Conference Proceedings (Novosibirsk, Russia, 8–12 August 2016) — 2016. — Vol. 1771, — p.050013. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.4964207> (дата публикации: 11.10.2016).

Пинженин Егор Игоревич

**Применение методов ядерной физики для диагностики
быстрых частиц на установке ГДЛ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Сдано в набор 13.04.2026.

Подписано в печать 14.06.2026.

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

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 8

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