



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
**Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук**  
(ФТИ им. А.Ф. Иоффе)

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

Тел. (812) 297-22-45, факс (812) 297-10-17

post@mail.ioffe.ru, http://www.ioffe.ru

ОКПО 02698463, ОГРН 1037804006998, ИНН 7802072267, КПП 780201001

17.04.2026 № 04.02.01-0990  
На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**«УТВЕРЖДАЮ»**

Зам. директора по научной работе  
Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Физико-технического института  
им. А.Ф. Иоффе  
Российской академии наук  
доктор физ.-мат. наук

П.Н. Брунков

«17» апреля 2026 г.



**ОТЗЫВ**

ведущей организации

на диссертацию

Пинженина Егора Игоревича

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

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 темы диссертации**

Актуальность диссертационной работы Е.И. Пинженина определяется необходимостью диагностического обеспечения экспериментов на модернизированной установке ГДЛ, где в условиях возросших параметров плазмы (мощность инжекции до 5 МВт, длительность до 5 мс, электронная температура до 1 кэВ) проявились новые физические эффекты: альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость, генерация перегретых электронов, перестроение функции распределения быстрых ионов. Для изучения этих явлений автором был создан комплекс диагностик на основе методов ядерной физики, позволяющий регистрировать продукты DD-реакции, потоки быстрых атомов перезарядки и гамма-кванты. Полученные результаты важны как для понимания фундаментальных процессов удержания плазмы в открытых ловушках, так и для практической реализации термоядерных источников нейтронов.

## **Научная новизна, обоснованность и достоверность научных положений, сформулированных в диссертации**

В диссертационной работе Е.И. Пинжениным получен ряд новых результатов, вносящих существенный вклад в развитие методов диагностики быстрых частиц и продуктов ядерного синтеза в открытых магнитных ловушках.

Впервые разработана, изготовлена и внедрена в эксперимент на установке ГДЛ многоканальная диагностика быстрых атомов перезарядки на основе линеек полупроводниковых диодов с тонким мертвым слоем (AXUV16ELG и экспериментальные лавинные диоды ИФП СО РАН), работающая по схеме камеры-обскуры. Диагностика позволяет с высоким пространственным ( $\sim 3$  см) и временным (до 100 нс) разрешением наблюдать накопление быстрых ионов, их потери при развитии МГД-активности и перераспределение в результате неустойчивостей. Проведенное автором исследование свойств экспериментальных лавинных диодов в режимах с усилением при регистрации как оптического излучения, так и частиц с энергией от единиц кэВ показало перспективность их применения для регистрации сигналов малой интенсивности.

Впервые на установке ГДЛ (и в целом в практике экспериментов на магнитных ловушках в России) создана и откалибрована диагностика продуктов реакции синтеза на основе полупроводниковых диодов, позволяющая регистрировать 3.02 МэВ протоны в счетном режиме с временным разрешением до 100 мкс и проводить абсолютные измерения интенсивности DD-реакции. С использованием разработанной системы детекторов, расставленных вдоль оси установки, впервые экспериментально зарегистрировано перестроение продольного профиля быстрых ионов при развитии альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости, что подтверждено моделированием кодом DOL и является прямым свидетельством уширения функции распределения частиц по питч-углам.

Впервые создан и применен в условиях ГДЛ спектрометр нейтронов и гамма-квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и ПЛИС, в котором реализован метод частотно-градиентного анализа для разделения частиц по сорту в режиме реального времени. Прибор позволил не только надежно идентифицировать нейтроны с энергией 2.45 МэВ на фоне интенсивного рентгеновского излучения, но и впервые получить данные о спектре жесткого рентгена, генерируемого перегретыми электронами при дополнительном СВЧ-нагреве и инжекции электронного пучка. Показана принципиальная возможность одновременной регистрации 2.45 МэВ и 14 МэВ нейтронов, что важно для планируемых дейтерий-третиевых экспериментов.

Положения, выносимые на защиту, сформулированы четко и полностью соответствуют основным результатам, изложенным в диссертации. Их достоверность подтверждена как автором в основных публикациях, так и успешной верификацией разработанных методик в независимых экспериментах на других установках (создание аналогичной диагностики протонов командой MST совместно с TAE Technologies на C-2U, внедрение диагностики на токамаке Глобус-М2 при участии автора). Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, и многократно докладывались на международных и всероссийских конференциях.

### **Практическая ценность результатов**

Практическая значимость диссертационной работы заключается в создании, экспериментальной отработке и внедрении в штатную на установке ГДЛ комплекса диагностик на основе методов ядерной физики. Разработанные детекторные модули для регистрации 3.02 МэВ протонов на основе полупроводниковых диодов позволяют проводить абсолютные измерения

выхода DD-реакции с временным разрешением до 100 мкс и используются для оптимизации режимов удержания плазмы. Данная методика успешно воспроизведена на установках Глобус-2М и С-2U, что подтверждает ее универсальность. Созданные камеры-обскуры на основе линеек диодов AXUV и экспериментальных лавинных диодов обеспечивают визуализацию плазмы в свете быстрых атомов перезарядки и применяются для верификации моделей вихревого удержания и альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости. Разработанный стильбеновый спектрометр нейтронов и гамма-квантов с обработкой сигналов в ПЛИС в реальном времени позволяет разделять вклады нейтронов и гамма-излучения при скоростях счета до  $6.6 \cdot 10^5$  событий/с и может применяться в дейтерий-третиевых экспериментах для одновременной регистрации 2.45 МэВ и 14 МэВ нейтронов. Результаты работы могут быть полезны при проектировании диагностических комплексов для действующих и перспективных термоядерных установок, включая источники нейтронов на базе магнитных ловушек.

### **Содержание диссертации и замечания по диссертационной работе**

Диссертационная работа Е.И. Пинженина состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и трех приложений.

Во Введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи работы, отмечена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации работы.

В первой главе представлен краткий обзор экспериментальных и теоретических результатов по изучению функции распределения быстрых частиц на установке ГДЛ. Приведено описание установки, ее основных параметров и систем нагрева. Обсуждены результаты ранних экспериментов с длительностью инжекции 1 мс, включая измерения пространственного распределения плотности быстрых ионов и энергобаланса плазмы.

Вторая глава посвящена разработке и применению многоканальной диагностики для изучения быстрых атомов, покидающих плазму ГДЛ. Рассмотрены свойства диодов AXUV и экспериментальных лавинных диодов ИФП СО РАН при регистрации частиц и излучения. Описаны конструкция и характеристики камер-обскур на основе диодных линеек, установленных в центре и вблизи точки останова. Приведены результаты наблюдения МГД-активности плазмы, дифференциального вращения и альфвеновской ионно-циклотронной неустойчивости. Представлена авторская модель, объясняющая модуляцию сигнала при вращении плазмы.

В третьей главе описана диагностика продуктов термоядерной реакции на ГДЛ. Дан краткий обзор методов регистрации нейтронного потока. Подробно рассмотрена реализация детекторов 3.02 МэВ протонов на основе полупроводниковых диодов и сцинтилляционного детектора нейтронов с ФЭУ. Приведены результаты измерения абсолютного выхода DD-реакции, продольного профиля интенсивности синтеза, влияния ЭЦР-нагрева на удержание быстрых частиц, а также данные по перестроению профиля при развитии АИЦ-неустойчивости и в экспериментах с измененной магнитной конфигурацией.

Четвертая глава посвящена разработке и калибровке спектрометра быстрых нейтронов и гамма-квантов на основе стильбенового сцинтиллятора и ПЛИС. Описан дизайн прибора, реализованные режимы работы (регистрация формы импульсов, калибровочный, спектрометрический). Подробно изложен метод частотно-градиентного анализа для разделения нейтронов и гамма-квантов в реальном времени. Приведены результаты энергетической и амплитудной калибровки с использованием радиоизотопных источников и ускорительных генераторов DD и DT нейтронов. Показаны результаты тестирования спектрометра в плазменных

экспериментах на ГДЛ, включая регистрацию рентгеновских вспышек при ЭЦР-нагреве и инжекции электронного пучка.

В Заключение сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы.

Приложения содержат результаты моделирования пробегов частиц в веществе с помощью программы SRIM, данные по сечениям реакций синтеза и результаты моделирования коллиматоров в программе Comsol.

К диссертационной работе имеются следующие замечания и вопросы:

1. В главе 1 основное внимание уделено детальному описанию результатов, полученных на установке ГДЛ. Результаты с других установок (С-2, NSTX, Alcator C-Mod и др.) лишь кратко упоминаются в тексте этой и последующих глав, но не сведены в обзорной части для сравнительного анализа параметров удержания быстрых частиц или подходов к диагностике. Для более полного представления о месте данной работы в мировых исследованиях было бы целесообразно расширить литературный обзор данными с других установок с магнитным удержанием.
2. Замечания к терминологии:
  - a. В тексте диссертации автор использует термины “термоядерная реакция”, “термоядерные протоны” и “термоядерные нейтроны”. Применение выражения “термоядерный” в контексте ГДЛ является общепринятым профессиональным жаргоном, однако, как справедливо отмечено в самой работе, в условиях ГДЛ основной вклад в выход нейтронов с энергией 2.45 МэВ вносит взаимодействие инжектированных быстрых ионов с теплой плазмой, а также столкновения быстрых ионов между собой. Поскольку энергия относительного движения сталкивающихся частиц здесь определяется не столько температурой основной плазмы (которая составляет доли кэВ), сколько энергией инжекции (22–25 кэВ), более корректным было бы использование термина “реакция ядерного синтеза” а не “термоядерная реакция”.
  - b. В работе гамма-кванты классифицируются наряду с протонами и нейтронами как “продукты реакции синтеза”. Следует уточнить, что в каналах DD-реакции непосредственного выхода гамма-излучения не происходит. В контексте экспериментов на ГДЛ регистрируемое гамма-излучение имеет тормозную природу, либо является следствием радиационного захвата нейтронов в материалах установки. Вероятно, в тексте диссертации подразумевается, что диагностика гамма-излучения может быть использована и для регистрации гамма-квантов, рожденных в реакции синтеза, однако в рамках данной работы было бы методически более точно разделять первичные продукты DD-синтеза (p, n, T,  $^3\text{He}$ ) и вторичное гамма/рентгеновское излучение плазмы и конструкций.
  - c. «Глобус-2М» (стр. 10) правильно называть «Глобус-М2».
  - d. «Энергоанализаторы атомов на основе AXUV диодов» (стр. 25 и далее) и им подобные в литературе принято называть твердотельные анализаторы атомов перезарядки (solid state NPA).
3. В пункте “Научная новизна” (стр. 9) автор утверждает, что “впервые на установке ГДЛ реализована диагностика продуктов термоядерной реакции на основе диодов...”. Данная формулировка, хотя и является абсолютно корректной, представляется излишне скромной и не в полной мере отражает достигнутый уровень работы. Насколько нам известно, данная

разработка была впервые реализована в России, а возможно, и впервые в мире на линейных магнитных ловушках открытого типа.

4. На стр. 31 автор пишет: "...нейтральные частицы со средней энергией 10 кэВ (и максимальной энергией, равной энергии инжекции)...". Данное утверждение является приближением и требует уточнения. В условиях ГДЛ, особенно в режимах с высокой электронной температурой (до 1 кэВ при ЭЦР-нагреве), быстрые ионы, тормозясь на электронах, испытывают диффузию в пространстве энергий. Благодаря стохастическому характеру кулоновских столкновений, небольшая доля ионов может приобретать энергию, превышающую энергию инжекции на величину порядка температуры электронов. Отметим, что для целей данной диагностики (измерение пространственных профилей) это уширение энергетического спектра не является критичным.
5. В работе не приведены иллюстрации траекторий быстрых частиц в магнитной конфигурации ГДЛ. Их добавление существенно улучшило бы восприятие материала и сделало бы интерпретацию диагностических данных более наглядной.
6. На стр. 39 автор производит оценку мощности тормозного и рекомбинационного излучения, принимая допущение о чисто водородной плазме. Обоснованием низкого эффективного заряда служит отсутствие линий примесей в видимом и УФ диапазонах. Данное обоснование представляется недостаточным. Наиболее интенсивные линии тяжелых примесей (например, железа или титана — материал напыления в ГДЛ) лежат в рентгеновском диапазоне (единицы кэВ). В связи с этим возникает вопрос: проводились ли в данных экспериментах (или аналогичных режимах ГДЛ) измерения спектров мягкого рентгеновского излучения или использовался рентгеновский спектрометр для контроля содержания тяжелых примесей?
7. В разделе 3.1 при обзоре методов регистрации нейтронов отсутствует упоминание газоразрядных детекторов, которые являются наиболее распространенным и простым типом нейтронных мониторов на многих термоядерных установках. Было бы полезно кратко указать причину, по которой данный тип детекторов не рассматривался для применения на ГДЛ.
8. С чем связана ширина спектра протонов на рис. 3.5 - с аппаратным разрешением детектора, страгглингом в фольге или физическим уширением линии из-за теплового движения дейтронов?
9. Можно ли увеличить максимальную скорость счета нейтронного спектрометра, или это принципиальное ограничение данной реализации диагностики?
10. В работе также имеется несколько опечаток, например стр. 21 «в 1,5 раз» -> «в 1,5 раза»; стр. 51 «начальное распределение нагревных инжекторов» -> «начальное распределение быстрых ионов, возникающих при использовании нагревных инжекторов»; у рис. 3.1. не обозначена ось абсцисс; стр. 71: «в 8.55 мс...» -> «на 8.55 мс...»; стр. 74: «растут в течение» -> «растут в течение»; стр. 118 «Измерения в спектра» -> «Измерения спектра».

*Сделанные в отзыве замечания не носят принципиального характера и не снижают положительной оценки диссертации Е.И. Пинженина.*

### Заключение семинара Лаборатории физики высокотемпературной плазмы

1. Диссертация Е.И. Пинженина является законченным научно-квалификационным трудом, в котором решена важная задача – создан и внедрен на установку ГДЛ комплекс диагностик на основе методов ядерной физики для регистрации продуктов реакции синтеза и быстрых атомов перезарядки. Разработанные автором приборы и методики позволили получить новые данные об удержании быстрых ионов, влиянии неустойчивостей на их функцию распределения и динамике плазмы в целом. Практическая значимость работы подтверждается применением созданных диагностик в многолетних экспериментальных кампаниях на ГДЛ, а также воспроизведением аналогичных решений на других установках (MST, C-2U, Глобус-2М). Результаты диссертации могут быть востребованы при создании диагностических систем для будущих термоядерных установок и источников нейтронов на базе магнитных ловушек.
2. Содержание диссертационной работы Е.И. Пинженина «Применение методов ядерной физики для диагностики быстрых частиц на установке ГДЛ» соответствует паспорту научной специальности 1.3.9 Физика плазмы.
3. Автореферат оформлен в соответствии с требованиями ВАК и полностью отражает содержание диссертации.
4. Результаты работы опубликованы в высокорейтинговых научных журналах, в том числе из Перечня ВАК, а также неоднократно докладывались на международных конференциях.
5. Диссертация Е.И. Пинженина «Применение методов ядерной физики для диагностики быстрых частиц на установке ГДЛ» соответствует требованиям и критериям, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а ее автор Пинженин Егор Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9. Физика плазмы.

Отзыв подготовил: кандидат физ.-мат. наук,  
Старший научный сотрудник Лаборатории физики  
высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
Тел.: +7 (911) 743-51-13  
E-mail: bakharev@mail.ioffe.ru



Бахарев Николай Николаевич

Материалы диссертации были доложены на семинаре Лаборатории физики высокотемпературной плазмы Отделения физики плазмы, атомной физики и астрофизики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. Отзыв на диссертацию Е.И. Пинженина рассмотрен и одобрен на семинаре Лаборатории физики высокотемпературной плазмы 17 апреля 2026 г. На заседании присутствовало 25 чел., из них 3 доктора физ.-мат. наук, 10 кандидатов физ.-мат. наук. Заключение принято большинством голосов: «за» – 25, «против» – 0, «воздержался» – 0.

Заведующий лабораторией физики  
высокотемпературной плазмы ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
доктор физ.-мат. наук, профессор  
Тел.: +7 (812) 292-73-89  
E-mail: Evgeniy.Gusakov@mail.ioffe.ru



Гусаков Евгений Зиновьевич

Подписи Бахарева Н.Н. и Гусакова Е.З. заверяю:  
Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе,  
кандидат физ.-мат. наук



Патров Михаил Иванович

« 17 » апреля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук  
Адрес: 194021, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26  
Тел.: +7 (812) 297-22-45  
Эл. почта: post@mail.ioffe.ru  
Сайт организации: <https://www.ioffe.ru>