

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертацию **Шестакова Евгения Андреевича**

«Управление пучками ускоренных электронов и МГД возмущениями с помощью СВЧ нагрева и резонансных магнитных полей в плазме токамака Т-10», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

Срыв разряда в настоящее время является наибольшей реальной угрозой будущему термоядерному реактору на базе токамака. Неконтролируемый срыв непременно приведет к повреждениям элементов вакуумной камеры из-за сверхвысокой энергетической нагрузки и как следствие, долгому ремонту, простоя реактора и существенным финансовым затратам. Срывы сопровождаются образованием пучков ускоренных электронов с большой энергией (десятки МэВ). Локальное попадание такого пучка на элементы установки может приводить к тепловым нагрузкам в несколько ГВт/м².

Диссертационная работа Шестакова Евгения Андреевича посвящена экспериментальному исследованию параметров пучков ускоренных электронов, образующихся, не только при срыве разряда, а также исследованию методов воздействия на пучки ускоренных электронов, поэтому тема диссертационной работы, безусловно, является **актуальной**.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Во **введении** автор обосновывает актуальность диссертации, формулирует цели и задачи исследования, приводит научную новизну работы, её практическую значимость. Также во введении представлены основные положения диссертации, выносимые на защиту, и научные публикации автора по теме диссертации.

Первая глава диссертации является литературным обзором и содержит основные механизмы образования и «гашения» пучков ускоренных электронов в токамаках, научные достижения других экспериментальных тороидальных установок в исследовании пучков ускоренных электронов, в особенности касающихся примененных в его работе подходов: влияние электронно-циклотронного резонансного (ЭЦР) нагрева, а также влияние внешних резонансных магнитных полей на устойчивость разряда и образование пучков ускоренных электронов.

Во **второй** главе автор диссертации подробно описал задействованные в исследовании диагностики (спектрометры надтеплого и жесткого рентгеновского излучения) и особенности их применения на Т-10. Оставшаяся часть второй главы посвящена регистрации пучков ускоренных электронов на различных стадиях разряда на токамаке Т-10 и эволюции их параметров во времени.

Третья глава содержит результаты экспериментов по подавлению срывов с помощью ЭЦР нагрева, а также комбинации ЭЦР нагрева и управляемого уменьшения тока плазмы. Найдено оптимальное положение

области поглощения ЭЦР нагрева и определены пороги мощности для подавления срыва.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию влияния внешних резонансных магнитных полей на срывы и генерацию ускоренных электронов. В начале главы подробно описана конструкция системы внешних резонансных магнитных полей, ее система питания и управления. Оставшаяся часть четвертой главы посвящена экспериментам, в которых было обнаружено уменьшение частоты вращения магнитогидродинамических (МГД) возмущений и даже полная остановка вращения, приводившие к срыву разряда.

В **заключении** приведены в краткой форме основные результаты диссертации.

Научная новизна и ценность работы заключается в детальном исследовании параметров и временной эволюции пучков ускоренных электронов в широком диапазоне энергий (25 кэВ – 10 МэВ) в токамаке T-10 на различных стадиях разряда. А также в том, что было показано значительное уменьшение генерации пучков ускоренных электронов при использовании литийсодержащих покрытий лимитера, предположительно связанное с уменьшением количества примесей в периферийных областях плазмы. К научной новизне и ценности также стоит отнести демонстрацию подавления пучков ускоренных электронов на токамаке T-10 при точном позиционировании ЭЦР нагрева на резонансной магнитной поверхности и связи формируемых нагревом квазистационарных МГД возмущений с подавлением пучков. Нельзя не отметить и найденные пороги дестабилизации МГД возмущений при воздействии на плазму внешних резонансных магнитных полей, экспериментально определенные характеристики рассеянного поля T-10 (направление и величина).

Практическая значимость работы состоит в том, что автором создан диагностический комплекс с хорошим временным, пространственным и спектральным разрешением, позволяющий проводить томографические измерения и восстанавливать двумерное распределение интенсивности пучка ускоренных электронов. Создана система генерации внешних резонансных магнитных полей. Отлажен метод подавления срыва и восстановления разряда с помощью ЭЦР нагрева и управляемого уменьшения тока плазмы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов определяются качественным планированием экспериментов на токамаке T-10, проработанностью использованных диагностических методов рентгеновской спектроскопии, тщательной калибровкой детекторов, а также сравнением полученных в экспериментах результатов с теоретическими моделями и результатами других установок. В пользу достоверности и обоснованности также говорит большое количество статей Шестакова Евгения Андреевича в ведущих международных и российских рецензируемых научных журналах.

К работе Шестакова Е.А., тем не менее, имеется несколько **замечаний**:

1) В первой главе диссертации стоило бы более четко определить и описать

употребляемые термины теплового срыва, токового срыва, срыва по предельной плотности. Так, например, если рассмотреть предложения «Крупномасштабные МГД возмущения приводят к усилению диффузии ускоренных электронов и предотвращают их развитие после срыва» (стр. 20) и «Стратегия основана на стабилизации магнитогидродинамических (МГД) возмущений во время неустойчивости срыва» (о восстановлении разряда после теплового срыва стр. 21), то можно предположить противоречие.

2) В работе не упоминаются другие, отличные от токамака, конфигурации тороидальных магнитных ловушек, в которых не существует проблемы неустойчивости срыва, хотя эти конфигурации могут рассматриваться как альтернативный вариант будущего энергетического термоядерного реактора. Во введении было бы полезно упомянуть данный факт.

Указанные замечания не снижают научной значимости и общей положительной оценки диссертационной работы.

Представленная диссертационная работа является целостным научным трудом, вклад автора в который является определяющим. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Диссертационная работа Шестакова Евгения Андреевича «Управление пучками ускоренных электронов и МГД возмущениями с помощью СВЧ нагрева и резонансных магнитных полей в плазме токамака Т-10» соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в редакции Постановления Правительства Российской Федерации от 01 октября 2018 г. № 1168), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Официальный оппонент

Борзосеков Валентин Дмитриевич, кандидат физико-математических наук по специальности «Физика плазмы» (01.04.08), старший научный сотрудник отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН.

Адрес. 119991, г. Москва, ул. Вавилова, 38, ИОФ РАН, отдел физики плазмы.
Тел. +7 (499) 503-8777, доб. 5-82.

Адрес электронной почты borzosekov@fpl.gpi.ru
<https://www.gpi.ru/>

В.Д. Борзосеков
20 сентября 2019 г.



Подпись В.Д. Борзосекова удостоверяю

ВРИО ученого секретаря ИОФ РАН
д.ф.-м.н.



В.В. Глушков