



УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
доктор технических наук  
И.В. Марков

« 13 » \_\_\_\_\_ 2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации 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

Кандидатская диссертация Шестакова Евгения Андреевича посвящена изучению процессов формирования пучков ускоренных электронов и методов их подавления с целью предотвращения возможного повреждения внутрикамерных элементов будущего токамака-реактора.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы из 87 наименований. Работа изложена на 116 страницах, содержит 3 таблицы, 51 рисунок и 16 формул. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

**Актуальность работы** связана с необходимостью разработки методов предотвращения формирования и развития пучков ускоренных электронов в плазме токамака. При развитии неустойчивости срыва плазмы в токамаке образуются пучки ускоренных частиц в момент развала плазменного шнура при развитии магнитогидродинамических (МГД) возмущений. При этом происходит перехват тока плазмы током ускоренных электронов, который может составлять до 70% тока плазмы (в крупных токамаках до нескольких мегаампер). Локальное выделение такой мощности в любом месте камеры может привести к серьезным повреждениям внутрикамерных элементов. Формирование пучков ускоренных электронов ( $E \sim 0.5-50$  МэВ) при развитии срыва плазмы и их возможное взаимодействие с поверхностью защитных элементов является одной из основных проблем успешной реализации проекта ИТЭР. Исследования процессов генерации пучков ускоренных электронов и разработка методов их подавления являются актуальными задачами современных исследований.

## Содержание диссертации

Во введении описывается актуальность проблемы безаварийной работы термоядерного реактора, связанная с возможным образованием пучков ускоренных электронов и повреждением внутрикамерных элементов. Описываются требования к разработке методов подавления пучков ускоренных электронов, актуальность данной диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость, формулируются цели и задачи диссертации и положения, выносимые на защиту.

В 1 главе приводится обзор современного состояния исследований пучков ускоренных электронов и методов воздействия на них. Подробно описываются теоретические представления по формированию пучков ускоренных электронов, показывается, что при определенных условиях пучки ускоренных электронов могут перехватывать до 70% тока плазмы будущего термоядерного реактора на основе токамака. Однако не до конца ясен механизм эволюции ускоренных электронов на различных стадиях плазменного разряда, в частности влияние статических факторов (конструкция вакуумной камеры, топология магнитных силовых линий магнитной системы токамака) и динамических (внешние резонансные магнитные возмущения, дополнительный нагрев, накопление в вакуумной камере пыли). Для наиболее достоверного прогнозирования эволюции пучков ускоренных электронов будущий токамак-реактор должен быть оснащен необходимым набором диагностических систем (в следующей главе приводится описание разработанной Шестаковым Е.А. для токамака Т-10 диагностики пучков ускоренных электронов и полученные с ее помощью экспериментальные данные).

Так же в 1 главе рассматриваются основные методы подавления пучков ускоренных электронов, включая воздействие СВЧ волн и внешних резонансных магнитных полей. Несмотря на важность и актуальность задачи, объем проведенных в мире исследований в области подавления ускоренных электронов не полон. В диссертации Шестакова Е.А. предлагаются новые подходы и проводятся дополнительные эксперименты по применению СВЧ нагрева и внешних резонансных магнитных полей для поиска наиболее эффективного метода подавления пучков ускоренных электронов.

Во 2 главе приведены результаты исследования эволюции ускоренных электронов на различных стадиях плазменного разряда в токамаке Т-10. Глава разбита на две логически связанные части. В первой части приводится описание диагностического комплекса, разработанного и оборудованного Шестаковым Е.А. Диагностический комплекс состоит из многоракурсной системы диагностики надтеплого рентгеновского излучения ( $E_{\gamma} \sim 25 \text{кэВ} \div 0.3 \text{МэВ}$ ) в потоковом режиме на основе CdTe детекторов ( $10 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$ ), системы внутрикамерных и внешних CdTe детекторов ( $5 \times 5 \times 3 \text{ мм}^3$ ), с интегрированными спектрометрическими усилителями и с численной обработкой спектров, обеспечивающую измерение энергетических спектров рентгеновского излучения ( $E_{\gamma} \sim 0.2 \div 1 \text{ МэВ}$ ) с

повышенным временным разрешением (до 100 мкс), системы радиационно-стойких сцинтилляционных  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  детекторов ( $\text{Ø}38.1 \times 38.1 \text{ мм}$ ), обеспечивающих измерение спектров излучения в радиационных полях с повышенными потоками гамма квантов ( $E_\gamma \sim 2 \div 20 \text{ МэВ}$ ). Так же были разработаны программы сбора и обработки данных. Диагностический комплекс позволяет производить измерение параметров ускоренных электронов на всех стадиях плазменного разряда.

Во второй части 2 главы приводятся результаты экспериментальных исследований эволюции ускоренных электронов, проведенных с помощью вышеупомянутой диагностической системы. Показано, что пучки ускоренных электронов могут образовываться на всех стадиях плазменного разряда, так или иначе влияя на процесс протекания в вакуумной камере плазменного разряда. На начальной стадии пучки ускоренных электронов могут образоваться достаточно быстро (за времена около 10 мс). Показано, что на эффективность образования ускоренных электронов в значительной степени влияет состояние вакуумной камеры. В частности литиевое покрытие вакуумной камеры помогает получить разряды без образования ускоренных электронов на начальной стадии. Показано, что на стационарной стадии плазменного разряда пучки ускоренных электронов могут быть подавлены с помощью дополнительного СВЧ нагрева. Показано, что во время срыва пучки ускоренных электронов образуются преимущественно в центральных областях плазменного шнура.

В 3 главе рассматривается возможность применения дополнительного СВЧ нагрева плазмы с целью предотвращения пучков ускоренных электронов и стабилизации плазменных неустойчивостей во время теплового срыва при предельно высокой плотности для подавления пучков ускоренных электронов.

Показано, что достижение предела по плотности в токамаке T-10 обычно характеризуется серией малых срывов, в которых образуются пучки ускоренных электронов. Для ликвидации вспышек МГД возмущений и пучков ускоренных электронов на токамаке T-10 испытывались методы управляемого уменьшения тока плазмы и СВЧ нагрева после теплового срыва. Существенной особенностью экспериментов на токамаке T-10, описанных в данной диссертационной работе, является полное устранение тепловых срывов после срыва по предельной плотности и предотвращение образования надтепловых электронов с использованием ЭЦР нагрева в широком диапазоне параметров плазмы T-10 (при различных тороидальных магнитных полях,  $B_t = 2.1 \div 2.9 \text{ Тл}$ , токах плазмы  $I_p = 0.08 \div 0.24 \text{ МА}$ , разной скорости поддува газа) и с использованием заранее запрограммированного спада тока плазмы.

Срыв по предельной плотности вызывался дополнительным поддувом газа на квазистационарной стадии разряда. Контролируемое уменьшение тока плазмы до  $I_p \sim 0.08 \text{ МА}$  включается сразу после теплового срыва. Работа с низким током плазмы одновременно с выключением дополнительного поддува газа привела к

подавлению всплеск МГД возмущений и ускоренных электронов и, как следствие, восстановлению плазменного разряда.

Так же подавление всплеск МГД возмущений и подавление пучков ускоренных электронов может быть достигнуто с помощью дополнительного СВЧ. ЭЦР нагрев в этом случае включается сразу после первого теплового срыва. Показано, что при расположении зоны поглощения СВЧ мощности на рациональной поверхности  $q=2$  всплески МГД возмущений и всплески излучения из-за надтепловых электронов исчезают с задержкой  $50\div 70$  мс после включения ЭЦР нагрева. Дальнейшее вкладывание ЭЦР мощности приводит к полному подавлению МГД возмущений и пучков ускоренных электронов, и полному восстановлению квазистационарного плазменного разряда. Показано, что исчезновение ускоренных электронов во время ЭЦР нагрева на Т-10 наблюдается не только при полном подавлении МГД мод, но и в экспериментах с образованием постоянных МГД мод с «насыщенной» квазистатической амплитудой магнитных возмущений. Комбинированное действие уменьшения продольных электрических полей и возникновения стационарных МГД при СВЧ нагреве приводит к эффективному подавлению пучков ускоренных электронов.

В главе 4 описывается система генерации внешних резонансных магнитных полей, используемая в экспериментах на токамаке Т-10 для управления винтовыми магнитогидродинамическими возмущениями плазмы. Описывается расположение обмоток на токамаке Т-10, система питания и управления внешними резонансными магнитными полями.

Генерация внешних резонансных магнитных полей на токамаке Т-10 обеспечивалась системой из восьми седловых обмоток, расположенных вне вакуумной камеры на внешней стороне блоков катушек тороидального поля. Седловые обмотки расположены равномерно вдоль тороидального обхода токамака симметрично относительно экваториальной плоскости тора. Для обеспечения максимальной амплитуды магнитных полей оборудованы многовитковые обмотки прямоугольной формы с закругленными угловыми участками с длиной основания  $L_{SC} \approx 2$  м и высотой  $H_{SC} \approx 1.5$  м.

Для данной системы Шестаковым Е.А. была разработана программа управления источниками питания на основе программируемого логического контроллера Siemens S7-417 и программа сбора данных на основе персонального компьютера. Максимально достижимая амплитуда радиальной компоненты внешних резонансных магнитных полей на оси плазменного шнура токамака Т-10 составляет около 6-7 мТл, что позволяет проводить эксперименты по исследованию устойчивости плазменного шнура и эволюции ускоренных электронов при воздействии внешних магнитных полей.

Эффект воздействия внешних резонансных магнитных полей на МГД устойчивость плазмы проявляется наиболее отчетливо в экспериментах на токамаке Т-10 в режимах с резонансными значениями коэффициента запаса устойчивости на границе плазменного шнура ( $q_a=3$ ). При включении внешних резонансных магнитных полей в этом режиме разряда Т-10 происходит замедление частоты вращения МГД возмущений. После полной остановки вращения («запирания» моды) в режимах с резонансными значениями коэффициента запаса устойчивости на границе плазменного шнура ( $q_a=3$ ) наблюдается резкий рост амплитуды МГД возмущений с последующим срывом плазменного разряда.

Показано, что воздействие внешних полей на МГД устойчивость плазмы существенно зависит от пространственной ориентации внешнего резонансного магнитного поля. Замедление вращения и эффект полной остановки («запирания») МГД возмущений наблюдается только при одном выделенном направлении внешних магнитных полей. Автор выдвигает предположение, что в этом направлении внешнее магнитное поле совпадает по направлению с рассеянным полем токамака, таким образом усиливая эффект воздействия некомпенсированных радиальных магнитных полей на устойчивость плазмы. В результате проведенной серии экспериментов было получено значение амплитуды гармоник рассеянного поля токамака Т-10, составляющее 0.25 мТл, хорошо согласующиеся с ранее сделанными оценками.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

#### **Научная новизна представленных результатов**

- впервые в экспериментах с цельнометаллическими диафрагмами и литийсодержащими покрытиями первой стенки в токамаке Т-10 проведены измерения временной эволюции пространственных и энергетических характеристик ускоренных электронов;
- впервые продемонстрирована возможность подавления пучков ускоренных электронов с помощью управляемого воздействия крупномасштабных квазистационарных МГД возмущений, формируемых при СВЧ нагреве плазмы;
- впервые продемонстрировано восстановление устойчивого разряда после развития теплового срыва при высокой плотности с применением программы снижения тока плазмы без образования пучков ускоренных электронов;
- впервые в экспериментах на токамаке Т-10 исследованы пороги развития квазистационарных МГД возмущений при воздействии на плазму внешних резонансных магнитных полей в условиях с экранирующими проводящими экранами.

## **Практическая значимость и рекомендации по применению результатов**

– Разработанная автором диагностическая система токамака Т-10 для измерения пространственных и энергетических характеристик надтеплового и жесткого рентгеновского излучения ( $E_{\gamma}=25\text{кэВ}\div 10\text{МэВ}$ ) может быть положена в основу измерительной системы надтеплового и жесткого рентгеновского излучения для нового токамака Т-15МД в НИЦ «Курчатовский институт» и на других установках токамак.

– Разработанная автором система генерации квазистационарных (длительностью до 2 сек) и импульсных (частота до 10 Гц) магнитных возмущений с винтовыми гармониками может быть использована для установки Т-15МД в НИЦ «Курчатовский институт».

– Разработанные методики подавления пучков ускоренных электронов и управления МГД возмущениями с помощью СВЧ нагрева и внешних магнитных полей могут быть использованы в токамаке Т-15МД в НИЦ «Курчатовский институт» и на других установках токамак.

## **Достоверность и обоснованность представленных результатов**

Результаты измерений параметров ускоренных электронов, полученные в данной диссертационной работе в условиях вольфрамовой диафрагмы согласуются с исследованиями на других установках с аналогичными условиями первой стенки (KSTAR, DIII-D). Параметры ускоренных электронов в условиях литиевого покрытия первой стенки получены впервые и согласуются с теоретическими представлениями об эволюции ускоренных электронов в плазме токамака.

Эффект воздействия дополнительного нагрева на пучки ускоренных электронов на стационарной стадии разряда согласуется с аналогичным на других токамаках (KSTAR, ASDEX). Влияние СВЧ нагрева на пучки ускоренных электронов после теплового срыва исследовалось впервые, однако соответствует теоретическим представлениям о процессах, приводящих к ускорению и потерям ускоренных электронов из плазмы токамака.

Полученный в данной диссертационной работе порог дестабилизации МГД моды  $m=2$ ,  $n=1$  на токамаке Т-10 находится в хорошем согласии с моделью эволюции МГД возмущений, учитывающей момент инерции плазмы, динамическую вязкость и частоту вращения, и соответствует результатам исследований, полученных на других токамаках (DIII-D, Compass, JET). Определенная экспериментально с помощью системы внешних резонансных

магнитных полей амплитуда рассеянного поля токамака Т-10 соответствует оценкам, ранее сделанным по измерению гало-токов и токов замыкания.

### **Публикации**

По теме диссертации было опубликовано 14 научных статей в отечественных и зарубежных рецензируемых журналах и входящих в перечень ВАК (из них 13 входят в международную реферативную базу данных Scopus). В ходе выполнения диссертационной работы были разработаны три программы для ЭВМ и получены свидетельства на них. Результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на 9 конференциях. Представленные в диссертации результаты достаточно полно отражены в опубликованных работах.

### **Замечания**

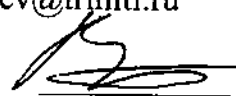
На некоторых графиках, представленных в диссертации, не указаны статистические и иные погрешности измерений, что несколько снижает ценность полученных данных.

### **Заключение**

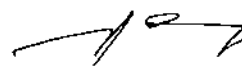
Диссертация Шестакова Е.А. «Управление пучками ускоренных электронов и МГД возмущениями с помощью СВЧ нагрева и резонансных магнитных полей в плазме токамака Т-10» является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне и удовлетворяющей требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 №842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор диссертации заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы».

Диссертация рассмотрена, а отзыв обсужден и одобрен после доклада соискателя и обсуждения диссертации на заседании Научного совета Государственного научного центра Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») 3 сентября 2019 г., протокол №6.

Отзыв подготовил: кандидат физико-математических наук,  
начальник лаборатории Отдела экспериментальной физики токамаков  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» Лазарев Владимир Борисович  
Адрес: Россия, 108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12  
Телефон: 7 (495)841-57-76, электронная почта: v\_lazarev@triniti.ru

 В.Б. Лазарев

Ученый секретарь АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»  
кандидат физико-математических наук

 А.А. Ежов