

На правах рукописи



Шестаков Евгений Андреевич

**Управление пучками ускоренных электронов и МГД  
возмущениями с помощью СВЧ нагрева и резонансных  
магнитных полей в плазме токамака Т-10**

Специальность 01.04.08 — Физика плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт».

**Научный руководитель:** **Саврухин Петр Всеволодович**  
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Курчатовского комплекса термоядерной энергетики и плазменных технологий НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва.

**Официальные оппоненты:** **Лебедев Сергей Владимирович**  
доктор физико-математических наук, первый заместитель директора по научной работе Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург;

**Борзосеков Валентин Дмитриевич**  
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Отдела физики плазмы Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва.

**Ведущая организация:** Акционерное общество «Государственный научный центр Российской федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований», г. Москва (г. Троицк).

Защита диссертации состоится 16 октября 2019 г., начало в 15.00, на заседании диссертационного совета Д 520.009.02 на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» по адресу: 123182, г. Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЦ «Курчатовский институт» и на сайте [www.nrcki.ru](http://www.nrcki.ru).

Автореферат разослан «    » 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 520.009.02  
кандидат физико-математических наук



А.В. Демура

## Общая характеристика работы

Повышение надежности и экономической эффективности токамака-реактора является одной из основных задач термоядерной энергетики. Эксперименты, проведенные в последнее время на крупных установках токамак, продемонстрировали возможность осуществления реакций синтеза в дейтерий-тритиевой плазме. Для практической реализации термоядерной энергетики в настоящее время продолжаются работы по сооружению токамака-реактора ИТЭР, направленного на отработку технологий термоядерного оборудования и поиск оптимальных режимов горения высокотемпературной дейтерий-тритиевой плазмы [1].

К сожалению, в современных экспериментах на токамаках, поддержание стационарных плазменных режимов вблизи операционных пределов (высокая плотность и давление плазмы) затруднено вследствие развития разнообразных возмущений плазмы. Это относится, в первую очередь, к развитию неустойчивости срыва плазмы [2, 3], приводящего к окончанию разряда и, в ряде случаев, к разрушению элементов конструкции термоядерных установок. Несмотря на многочисленные исследования в предыдущих экспериментах [2], особенности развития неустойчивости срыва в условиях термоядерного реактора все еще остаются до конца не выясненными. В первую очередь это относится к условиям развития неустойчивости при предельно высокой плотности плазмы и к анализу динамики ускоренных частиц в момент развала плазменного шнура при развитии магнитогидродинамических (МГД) возмущений [4]. 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 [5]. Исследования процессов генерации пучков ускоренных электронов и разработка методов их подавления являются актуальными задачами современных исследований.

В дополнение к основным общепринятым методикам подавления пучков ускоренных электронов, основанным, как правило, на безопасном гашении разряда с помощью напуска интенсивных потоков газа (с целью создания МГД возмущений) и инъекции макрочастиц, в Диссертации рассматриваются следующие методики, оборудованные на токамаке Т-10:

- нагрев плазмы с помощью СВЧ волн для управления МГД возмущениями и для уменьшения продольных электрических полей;
- программируемое снижение тока плазмы на начальной стадии срыва для восстановления устойчивого режима плазменного разряда.
- генерация внешних резонансных магнитных полей, создаваемых системой внешних седловых обмоток;

Комбинированное воздействие таких методик на развитие пучков ускоренных электронов в токамаке Т-10 является новым подходом, не исследовавшимся ранее в экспериментах на токамаках.

**Актуальность работы** связана с необходимостью разработки методов предотвращения развития пучков ускоренных электронов в плазме токамака.

**Целью диссертационной работы** является определение параметров ускоренных электронов с повышенным пространственным и временным разрешением на различных стадиях разряда в токамаке Т-10 с помощью рентгеновских диагностик и разработка методик подавления пучков ускоренных электронов при управляемом воздействии МГД возмущений и СВЧ нагреве плазмы.

**Задачи диссертационной работы:**

- разработка комплекса рентгеновских диагностик с повышенным пространственным и временным разрешением и определение параметров пучков ускоренных электронов на различных стадиях разряда в токамаке Т-10;
- развитие методик предотвращения генерации пучков ускоренных электронов при воздействии СВЧ нагрева плазмы и программируемого сценария плазменного разряда;
- разработка методик подавления пучков ускоренных электронов при воздействии МГД возмущений, управляемых с помощью СВЧ нагрева и внешних резонансных магнитных полей.

### **Научная новизна 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 на частоте второй гармоники электронного циклотронного резонанса (140 ГГц) в диапазоне мощностей 0,4 – 0,8 МВт при центральном поперечном вводе СВЧ мощности.
- впервые экспериментально продемонстрировано восстановление устойчивого разряда после развития теплового срыва при высокой плотности с применением управляемого 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 конструкциями.

### **Практическая значимость работы**

- Разработан и оборудован на токамаке Т-10 новый диагностический комплекс для измерения пространственных и энергетических характеристик надтеплового и жесткого рентгеновского излучения ( $E_\gamma = 0,025\text{—}10$  МэВ) с повышенным временным (до 10—100 мкс) и пространственным (до 2 см) разрешением. Разработанная диагностическая система положена в основу измерительной системы надтеплового и жесткого рентгеновского излучения, создаваемой для токамака Т-15МД.
- Разработана и оборудована система генерации квазистационарных (длительностью до 2 с) и импульсных (частота до 10 Гц) магнитных полей с

винтовыми гармониками  $n=1—7$ ,  $m=1—3$ . Система генерации магнитных полей используется при разработке системы резонансных обмоток для установки Т-15МД.

- 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 и на других установках токамак.

### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту**

- разработанный и оборудованный комплекс рентгеновских диагностик, включая многоактурную систему регистрации надтеплового рентгеновского излучения и спектрометры рентгеновского излучения на основе детекторов из теллурида кадмия и бромида лантана;
- результаты измерений пространственных и энергетических характеристик ускоренных электронов во время развития быстропеременных процессов в плазме токамака;
- методика подавления пучков ускоренных электронов с помощью дополнительного нагрева и формирования крупномасштабных квазистационарных МГД возмущений при СВЧ нагреве плазмы;
- система генерации внешних магнитных полей, разработанная и оборудованная на токамаке Т-10;
- пороги развития квазистационарных МГД возмущений при воздействии на плазму стационарных резонансных магнитных полей, генерируемых системой внешних седловых обмоток на токамаке Т-10.

### **Личный вклад автора**

1. Автором самостоятельно разработаны и оборудованы на токамаке Т-10 следующие диагностики:

- система внутрикамерных и внешних CdTe детекторов с интегрированными спектрометрическими усилителями, системой коллимирования и автоматизированного позиционирования;
- система многоканальных сцинтилляционных LaBr<sub>3</sub> детекторов.

2. Автором самостоятельно разработаны программы сбора и обработки данных, включая численный спектрометрический анализ данных.

3. Автор внес определяющий вклад в развитие методики и проведение экспериментов по подавлению пучков ускоренных электронов и управлению МГД возмущениями с помощью СВЧ нагрева плазмы.

4. Автор принимал непосредственное участие в проектировании, изготовлении и оборудовании на токамаке Т-10 системы генерации внешних резонансных магнитных полей.

5. Автором разработана, изготовлена и оборудована на токамаке Т-10 система управления источниками питания внешних резонансных магнитных полей.

6. Автором самостоятельно проведены эксперименты по исследованию влияния внешних магнитных полей на пороги развития МГД возмущений в плазме токамака Т-10.

### **Апробация результатов работы**

Результаты диссертационной работы были доложены на следующих конференциях:

- 17 Международная конференция студентов и аспирантов, МЭИ, 2011;
- 57 научная конференция МФТИ, 2014 г.;
- XLI—XLV Международные конференции по физике плазмы и УТС, г. Звенигород (2014—2018 гг.);
- 26-я конференция МАГАТЭ по Термоядерной энергии, Киото, Япония 2016 г.;

- 22-я Международная конференция по взаимодействию плазмы с поверхностью, 2016 г.;
- XVII Всероссийская конференция «ДИАГНОСТИКА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ», 2017 г.

Результаты диссертационной работы также доложены на семинарах ККТЭиПТ НИЦ «Курчатовский институт».

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):

1. V.A. Vershkov. Recent results of the T-10 tokamak / V.A. Vershkov, V.F. Andreev, A.A. Borschevskiy, V.V. Chistyakov, M.M. Dremin, L.G. Eliseev, E.P. Gorbunov, S.A. Grashin, A.V. Khmara, A.Ya. Kislov, D.A. Kislov, A.D. Komarov, A.S. Kozachek, V.A. Krupin, L.I. Krupnik, S.V. Krylov, S.E. Lysenko, S.G. Maltsev, V.A. Mavrin, A.V. Melnikov, G.E. Notkin, A.Yu. Novikov, Yu.D. Pavlov, S.V. Perfilov, V.V. Piperskij, G.N. Ploskirev, V.I. Poznyak, K.A. Razumova, I.N. Roy, D.V. Ryzhakov, P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov, D.A. Shelukhin, Yu.A. Skosyrev, R.V. Shurygin, G.N. Tilinin, E.V. Trukhina and V.M. Trukhin // 2011 Nucl. Fusion 51 094019 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/51/9/094019>

2. P.V. Savrukhin. Movable magnetic probe system in the T-10 tokamak / P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov // Review of Scientific Instruments 83, 013505 (2012); <https://doi.org/10.1063/1.3675577>

3. В.М. Трухин. Цифровая обработка сигналов полупроводникового рентгеновского детектора / В.М. Трухин, Д.В. Рьжаков, Е.А. Шестаков // Вопросы атомной науки и техники, том 36, выпуск 1, 2013, с. 78

4. P.V. Savrukhin. Tomographic analysis of the nonthermal x-ray bursts during disruption instability in the T-10 tokamak / P.V. Savrukhin, A.I. Ermolaeva, E.A. Shestakov, and A.V. Khramenkov // Review of Scientific Instruments 85, 103508 (2014)

5. A.V. Melnikov. Physical program and diagnostics of the T-15 upgrade tokamak (brief overview) / A.V. Melnikov, A.V. Sushkov, A.M. Belov, Yu.N. Dnestrovskij, L.G.



Eliseev, A.V. Gorshkov, D.P. Ivanov N.A. Kirneva, K.V. Korobov, V.A. Krupin, S.E. Lysenko, V.S. Mukhovatov, N.A. Mustafin, S.V. Perfilov, K.A. Razumova, I.N. Roy, P.V. Savrukhin, V.S. Strelkov, E.A. Shestakov, G.N. Tilinin, V.L. Vdovin // Fusion Engineering and Design Volumes 96–97, October 2015, Page 306

6. P.V. Savrukhin. A study on the effects of magnetohydrodynamic perturbations on nonthermal beam formation during the current decay phase of disruptions in the T-10 tokamak / P.V. Savrukhin and E.A. Shestakov // Nucl. Fusion 55 (2015) 043016

7. Yu.V. Martynenko. Tungsten erosion in tokamak at current disruption / Yu.V. Martynenko, V.P. Budaev, S.A. Grashin, E.A. Shestakov // Bull. Lebedev Phys. Inst. (2017) 44: 182. <https://doi.org/10.3103/S1068335617060070>

8. V.P. Budaev. Tungsten melting and erosion under plasma heat load in tokamak discharges with disruptions / V.P. Budaev , Y. Martynenko , S.A. Grashin , R.N. Giniyatulin , I.I. Arkhipov , A.V. Karpov, P.V. Savrukhin , E.A. Shestakov, R.Y. Solomatin , L.B. Begrambekov , N.E. Belova , S.D. Fedorovich , L.N. Khimchenko , V.M. Safronov // Nuclear Materials and Energy, Volume 12, August 2017, Page 418 <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.029>

9. P.V. Savrukhin. Restoration of the plasma discharge during density limit disruptions in the T-10 tokamak using electron cyclotron heating and ohmic power supply system / P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov // PHYSICS OF PLASMAS 23, 112509 (2016)

10. E.A. Shestakov. Effect of ECRH and resonant magnetic fields on formation of magnetic islands in the T-10 tokamak plasma / E.A. Shestakov and P.V. Savrukhin / J. Phys.: Conf. Ser. 907 012007, 2017

11. П.В. Саврухин. Стабилизация срыва плазмы в токамаке Т-10 с использованием СВЧ-нагрева и системы индукционного поддержания тока / П.В. Саврухин, Е.А. Шестаков, А.А. Борщеговский, А.И. Ермолаева, А.М. Какурин, С.Г. Мальцев, Ю.Д. Павлов, Д.В. Рыжаков, Д.В. Сарычев, Д.С. Сергеев, А.В. Сушков, А.В. Храменков // "Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез" 2017 г. Том 40, Выпуск 4, с. 50.

12. P.V. Savrukhin. Plasma arcs formation in the plasma periphery during disruptions in the T-10 tokamak plasma / P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov, A.I. Ermolaeva and R.Yu. Solomatina // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 907 (2017) 012006 doi :10.1088/1742-6596/907/1/012006

13. E.A. Shestakov. Generation of runaway electrons during the initial stage of the T-10 tokamak plasma discharge / E.A. Shestakov, P.V. Savrukhin, M.I. Ershova and A.V. Khramenkov // 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012004 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012004>

14. E.A. Shestakov. External resonance magnetic field control system based on the Siemens S7-400 controllers at the T-10 tokamak / E.A. Shestakov, P.V. Savrukhin and M.I. Ershova // 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012005 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012005>

В ходе выполнения диссертационной работы были разработаны следующие РИД и получены свидетельства на них:

1. Программа для ЭВМ «Программа сбора многоканального спектрометра мягкого рентгена «collect»» / В.М. Трухин, Е.А. Шестаков, Д.В. Рыжаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2013613260 от 28 марта 2013.

2. Программа для ЭВМ «Программа цифровой обработки сигналов многоканального спектрометра мягкого рентгена «SPECTR»» / В.М. Трухин, Е.А. Шестаков, Д.В. Рыжаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2014660742 от 15 октября 2014.

3. Программа для ЭВМ «DIGITLXRAY — Цифровая обработка данных многоканального спектрометра мягкого рентгена в условиях быстроизменяющихся процессов в плазме типа «пилообразных колебаний»» / В.М. Трухин, Е.А. Шестаков, Д.В. Рыжаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016610104 от 11 января 2016.

## **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, перечня сокращений и условных обозначений, списка использованной литературы из 87 наименований.

Диссертация содержит 116 страниц, 3 таблицы и 51 рисунок.

## **Содержание работы**

**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 методам воздействия на них.

В первых экспериментах на токамаках было показано, что образование пучков ускоренных электронов в высокотемпературной плазме токамака связано с наличием повышенных электрических полей, которые могут возникать во время пробоя на начальной стадии разряда и во время срыва при перестройке магнитной конфигурации плазмы [6].

Во время срыва пучки ускоренных электронов могут перехватывать до 70% тока плазмы и достигать нескольких мегампер [7]. Проведенные на токамаке T-10 исследования показывают, что энергия электронов в пучке может достигать 10 МэВ, а плотность тепловыделения  $3 \text{ ГВт/м}^2$  [8].

Для того, чтобы правильно оценивать возможные последствия образования ускоренных электронов в плазме токамака, необходимо знать их эволюцию во всех плазменных режимах и на любых стадиях плазменного разряда.

В настоящий момент требуют уточнения следующие особенности пучков ускоренных электронов в плазме токамака:

- механизм образования ускоренных электронов на различных стадиях плазменного разряда;
- влияние ускоренных электронов на возбуждение и развитие плазменных неустойчивостей;
- методы подавления мощных пучков ускоренных электронов во время срыва.

Для определения механизмов образования и эволюции пучков ускоренных электронов необходимо проводить измерения их параметров на различных стадиях плазменного разряда. Одним из основных методов измерения является регистрация тормозного рентгеновского излучения, возникающего при кулоновском взаимодействии ускоренных электронов с плазмой и элементами первой стенки. Регистрация рентгеновского излучения в потоковом режиме позволяет исследовать пространственно-временную эволюцию ускоренных электронов. Информацию об энергетическом распределении электронов в пучке могут дать спектрометрические измерения рентгеновского излучения. Однако восстановление реального спектра ускоренных электронов из измеренного спектра тормозного рентгеновского излучения с учетом всех особенностей взаимодействия жесткого рентгеновского излучения с веществом является сложной задачей [9, 10].

Уточнение механизмов образования ускоренных электронов позволит предсказывать их эволюцию в реальной плазме токамака-реактора, что позволит более своевременно принимать меры либо по их недопущению, либо по их подавлению на ранних стадиях развития. Это особенно важно с учетом того, что большинству методов подавления ускоренных электронов (например напуску благородных газов [11]) требуется значительное время (до нескольких миллисекунд) для получения необходимого эффекта.

В настоящей работе рассматриваются следующие методы воздействия на пучки ускоренных электронов:

- СВЧ нагрев;
- внешние резонансные магнитные поля.

СВЧ нагрев широко используется на современных токамаках для управления МГД устойчивостью плазмы, для генерации тока и нагрева плазмы. Продольное электрическое поле в токамаке, в котором происходит ускорение электронов во время срыва, складывается из индукционного поля за счет внешнего источника питания (и зависящего от полного сопротивления плазмы) и «наведенного», возникающего при изменении внутренней магнитной конфигурации плазмы (например, перезамыкании магнитных силовых линий). Использование дополнительного нагрева (например ЭЦР) позволит увеличить температуру плазмы и, как следствие, уменьшить ее сопротивление, а значит и напряжение на обходе тора, таким образом уменьшив ускоряющее электрическое поле. Непосредственное влияние СВЧ на МГД моды позволит так же ликвидировать вспышки МГД возмущений, а значит и убрать наведенные электрические поля. С помощью СВЧ нагрева так же можно создавать МГД возмущения с контролируемой квазистационарной амплитудой, приводящие к повышенным потерям ускоренных электронов.

Системы генерации внешних резонансных магнитных полей используются в экспериментах на токамаках для управления винтовыми магнитогидродинамическими возмущениями плазмы [2, 3, 12], для предотвращения развития пучков ускоренных электронов [13], исследования физических процессов в высокотемпературной плазме, включая вращение плазмы. Одной из основных задач современных исследований на крупных токамаках является также компенсация рассеянных полей для предотвращения развития «запертых» МГД мод [2].

Предотвращение роста крупномасштабных МГД возмущений и недопущение развития неустойчивости срыва является одним из ключевых принципов для безопасной работы термоядерного реактора и предотвращение образования пучков ускоренных электронов [14].

Во **2 главе** приведены результаты исследования эволюции ускоренных электронов на различных стадиях плазменного разряда в токамаке Т-10.

Для проведения измерений параметров ускоренных электронов и их эволюции на токамаке Т-10 был разработан и оборудован диагностический комплекс, который включает в себя:

– многоракурсную систему диагностики надтеплового рентгеновского излучения ( $E_{\gamma} \sim 25 \text{кэВ} - 0.3 \text{ МэВ}$ ) в потоковом режиме на основе CdTe детекторов ( $10 \times 5 \times 1 \text{ мм}^3$ ), обеспечивающую измерения эволюции пространственной локализации ускоренных электронов в течение срыва плазмы с повышенным временным (до 10 мкс) и пространственным (до 2 см) разрешением;

– систему 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 ( $E_{\gamma} \sim 0.2 - 1 \text{ МэВ}$ ) с повышенным временным разрешением (до 100 мкс);

– систему 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 ( $E_{\gamma} \sim 2-20 \text{ МэВ}$ ).

Спектрометрические детекторы были откалиброваны с использованием набора радиоактивных источников ОСГИ-3. Источники были подобраны таким образом, чтобы максимально перекрыть диапазон измерения энергии жесткого рентгеновского излучения вплоть до 2 МэВ. Измерительные каналы многоракурсной системы диагностики надтеплового рентгеновского излучения были откалиброваны с использованием рентгеновской трубки и методом перестановки в серии повторяющихся импульсов токамака Т-10.

На токамаке Т-10 исследовалось поведение пучков ускоренных электронов на начальной стадии разряда и их эволюция на стадии роста тока. Исследования проводились как с чисто вольфрамовой кольцевой диафрагмой, так и с литиевым покрытием внутрикамерных элементов. Рассматриваются различные типы разрядов как с образованием пучков ускоренных электронов во время пробоя на начальной стадии разряда, так и в режимах без образования начального пучка. Показано, что эволюция пучков ускоренных электронов на начальной стадии разряда зависит не только от макроскопических параметров плазмы, но и от внешних факторов (взаимодействие плазмы со стенкой, поступление примесей при случайном влете пылевых макрочастиц). При литиевом покрытии вакуумной камеры ускоренные электроны на начальной стадии не образуются, что подтверждается отсутствием начального всплеска жесткого

рентгеновского излучения. При этом жесткое рентгеновское излучение не появляется на всем протяжении разрядного импульса.

С помощью внутрикамерного теллурид кадмиевого детектора была исследована эволюция пучка ускоренных электронов, возникающего во время пробоя. Показано, что сигнал внутрикамерного детектора представляет из себя серию вспышек надтеплого рентгеновского излучения, которое практически не регистрируется внешними детекторами. Эти вспышки соответствуют тормозному излучению ускоренных электронов, движущихся в плазме. Частота вспышек примерно равна  $\sim 4$ кГц, что может соответствовать частоте вращения магнитных возмущений на начальной стадии разряда. Ускоренные электроны уже в первые 6 мс после начала пробоя набирают энергию свыше 600 кэВ. Через 10 мс после начала пробоя их энергия увеличивается до свыше 1.5 МэВ. Впервые на Т-10 были проведены измерения спектров тормозного рентгеновского излучения пучка ускоренных электронов при движении в плазме, а не при взаимодействии с диафрагмой.

Исследовалось влияние дополнительного СВЧ нагрева на пучок ускоренных электронов на квазистационарной стадии разряда (рисунок 1). На рисунке 1 показаны осциллограммы сигналов плазменных параметров: а) ток плазмы; б) напряжение на обходе плазменного шнура; в) интенсивность жесткого рентгеновского излучения; г) электронная плотность; д) мощность СВЧ нагрева; е) спектр жесткого рентгеновского излучения, измеренный с помощью NaI детектора.

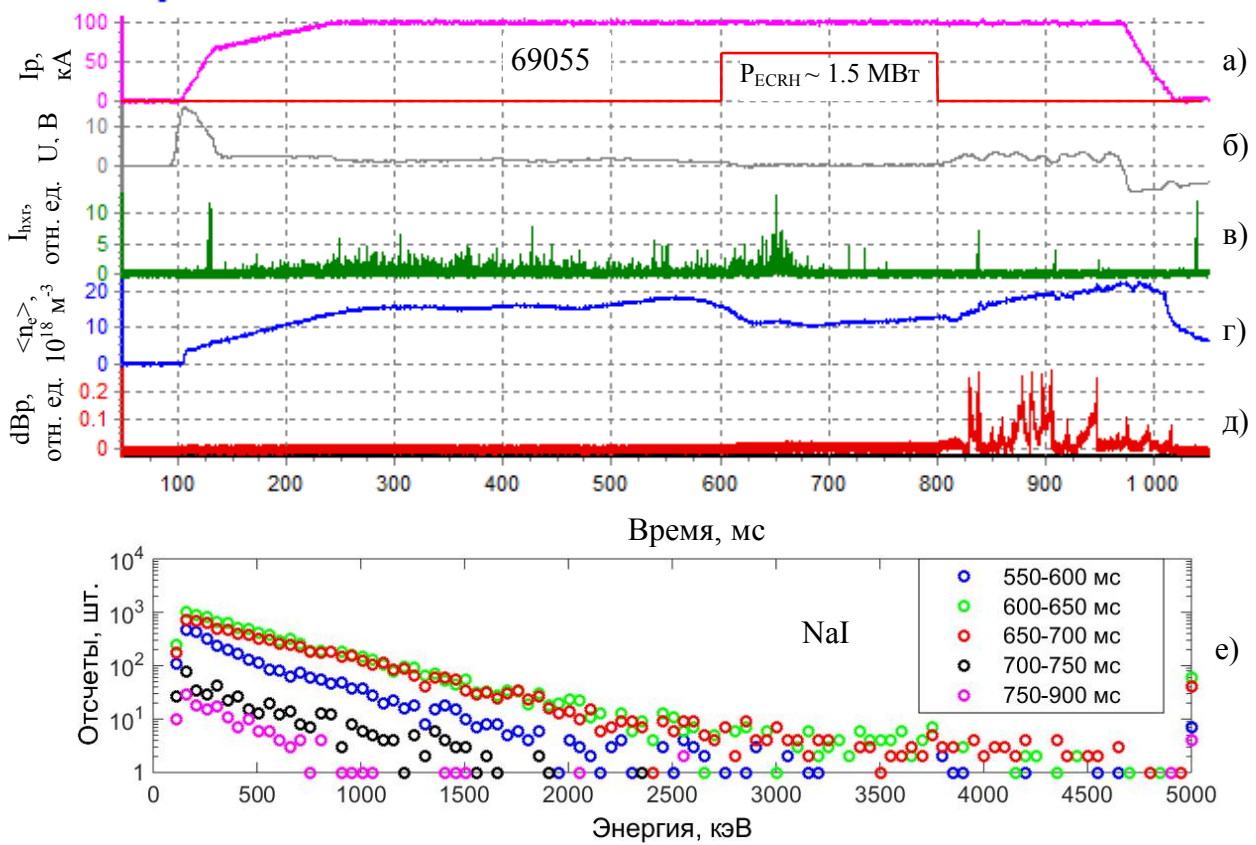


Рисунок 1. Влияние внешнего дополнительного нагрева на развитие пучка ускоренных электронов на квазистационарной стадии плазменного разряда в Т-10. Номер импульса показан в поле рисунка

Показано, что после включения дополнительного СВЧ нагрева ( $P_{ECRH} \sim 1.5$  МВт при мощности омического нагрева  $P_{OH} \sim 100$  кВт) в начальный момент времени наблюдается увеличение потока жесткого рентгеновского излучения как на мониторе, так и на спектрометре. Увеличение потока жесткого рентгеновского излучения связано с усилением взаимодействия пучка ускоренных электронов с кольцевой диафрагмой токамака Т-10 за счет усиления поперечного переноса электронов в турбулентных электромагнитных полях при вводе СВЧ мощности в плазму. Одновременно с этим, т.к. плазма нагревается и увеличивается ее проводимость, падает напряжение на обходе плазменного шнура, вследствие чего уменьшаются ускоряющие электрические поля. В совокупности это создает благоприятные условия для устранения существующего пучка и препятствие для образования новых ускоренных электронов.

С помощью многоракурсной диагностики надтеплового рентгеновского излучения анализировались плазменные разряды на токамаке Т-10 с омическим



нагревом плазмы во время срыва. В соответствии с предыдущими экспериментами на токамаке T-10 [15], срыв плазмы вызывается взаимодействием магнитных островов  $m=1$  и  $m=2$ , сопровождающимся перезамыканием магнитных силовых линий и вспышками жесткого рентгеновского излучения, которое наблюдается с помощью NaI монитора жесткого рентгеновского излучения. Анализ вспышек надтеплового рентгеновского излучения с помощью вертикальной камеры CdTe детекторов, показал временную неоднородность взаимодействия пучков ускоренных электронов с нижним подвижным лимитером установки T-10. Вспышки надтеплового рентгеновского излучения имеют характерные частоты  $f \sim 2.5 - 3$  кГц и оказываются локализованы в центральных областях подвижного лимитера.

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. В более ранних экспериментах была показана отсрочка срыва плазмы с помощью ЭЦР нагрева [16]. Существенное отличие настоящих экспериментов на T-10 заключается в полном устранении тепловых срывов после срыва по предельной плотности и предотвращении образования надтепловых электронов с использованием ЭЦР нагрева в широком диапазоне параметров плазмы T-10 (при различных тороидальных магнитных полях,  $B_t = 2.1-2.9$  Тл, токах плазмы  $I_p = 0.08-0.24$  МА, разной скорости поддува газа) и с использованием заранее запрограммированного спада тока плазмы.

Для изучения влияния запрограммированного уменьшения тока плазмы после теплового срыва на МГД возмущения и пучки ускоренных электронов в экспериментах на T-10 начальный ток плазмы был выбран достаточно большим, чтобы исключить «самостабилизацию» плазменного разряда после теплового срыва ( $I_p \sim 0.12$  МА). Срыв по предельной плотности вызывался дополнительным поддувом газа на

квазистационарной стадии разряда. Контролируемое уменьшение тока плазмы до  $I_p \sim 0.08$  МА включается сразу после теплового срыва. Работа с низким током плазмы одновременно с выключением дополнительного поддува газа привела к подавлению всплесков МГД возмущений и ускоренных электронов и, как следствие, восстановлению плазменного разряда. После восстановления плазменный разряд располагается в том же положении, что и до срыва.

Так же подавление всплесков 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 через  $dt=50-70$  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. Аналогично экспериментам с полной стабилизацией МГД мод создание стационарных МГД возмущений также приводит к исчезновению надтепловых электронов и задержке срыва плазмы. Хотя надтепловые электроны полностью исчезают, стационарных МГД возмущения приводят к серии вторичных срывов во время ЭЦР нагрева при расположении зоны поглощения снаружи от рациональной поверхности  $q=2$  или плохому удержанию плазмы при расположении зоны поглощения внутри рациональной поверхности  $q=2$ . Комбинированное действие уменьшения продольных электрических полей и возникновения стационарных МГД при СВЧ нагреве приводит к эффективному подавлению пучков ускоренных электронов.

Эффект подавления надтепловых электронов и МГД возмущений наблюдаются в экспериментах на Т-10 только при относительно высокой мощности ЭЦР нагрева. Пороговая мощность, требуемая для применения данной методики, зависит от

расположения зоны резонанса ЭЦР излучения в плазме. Эксперименты с ЭЦР нагревом при относительно высоком токе плазмы  $I_p = 0.22$  МА показали, что минимальная дополнительная мощность, необходимая для восстановления разряда, требуется при вкладе мощности ЭЦР нагрева вблизи поверхности с  $q = 2$ .

Пороговая мощность ЭЦР нагрева, необходимая для восстановления разряда и устранения надтепловых электронов, увеличивается в разрядах с большим током плазмы (рисунок 2). Восстановление разряда наблюдается в экспериментах с мощностью ЭЦР нагрева больше  $P_{ec} \sim c_{ec} I_p$ ,  $c_{ec} \approx 3$  Вт/А (пунктирная линия на рисунке 2).

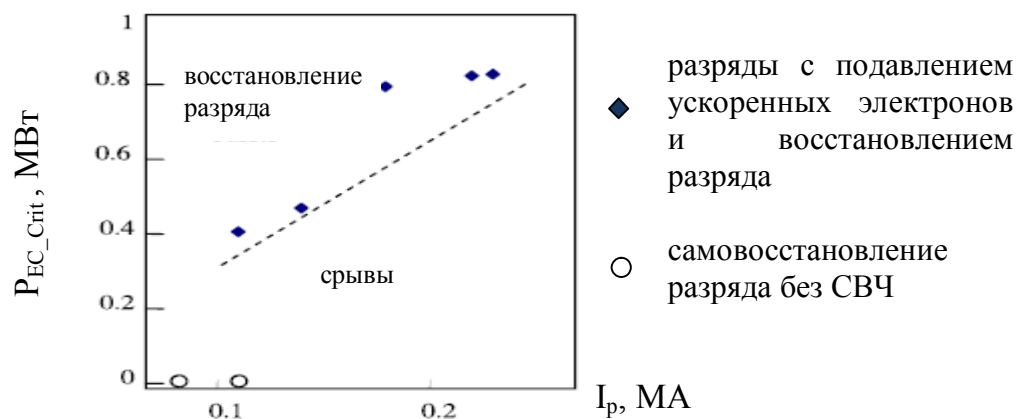


Рисунок 2. Зависимость мощности дополнительного ЭЦР нагрева, требуемой для восстановления разряда, от тока плазмы

Совместное использование системы дополнительного нагрева и контролируемого уменьшения тока плазмы после теплового срыва позволят более эффективно бороться с последствиями теплового срыва, чем при использовании этих систем по отдельности.

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 обеспечивается 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..

Генерация внешних магнитных полей на токамаке Т-10 обеспечивается с помощью тиристорных преобразователей ВДУ-1250 с максимальным током до 1250 А. Система управления источниками питания на токамаке Т-10 построена на базе программируемых логических контроллеров (ПЛК) Simatic Siemens S7-417. Система контроллера S7-417 на токамаке Т-10 обеспечивает временные интервалы включения напряжения источниками питания в соответствии с заложенной программой и измерение основных параметров управления, включая выходное напряжение и ток в обмотках.

Тестирование системы генерации внешних резонансных магнитных полей на токамаке Т-10 проводилось в серии квазиустойчивых разрядов с различными плазменными параметрами. Были определены операционные пределы работы системы питания, особенности синхронизации и управления. В большинстве экспериментов конфигурация внешнего магнитного поля соответствовала гармонике  $n=1$ . Эксперименты проводились в отсутствие подвижной диафрагмы; кольцевая диафрагма в этих экспериментах была оборудована вольфрамовыми тайлами, малый радиус диафрагмы  $a=33$  см.

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.

Эксперименты на токамаке Т-10 показали, что воздействие внешних полей на МГД устойчивость плазмы существенно зависит от пространственной ориентации внешнего резонансного магнитного поля [17]. Этот эффект проявляется наиболее отчетливо при анализе скоростей вращения МГД возмущений. Замедление вращения и эффект полной остановки («запирания») МГД возмущений (при заданных пониженных токах в седловых обмотках,  $I_{sc}=640$  А) наблюдается только при одном выделенном направлении внешних магнитных полей.

При выделенном направлении внешнего магнитного поля, совпадающего с направлением рассеянного поля токамака Т-10 ( $I$  на рисунке 3б), были проведены эксперименты [17] по определению порога дестабилизации МГД возмущений при различных токах в седловых обмотках. При достаточно больших токах в седловых обмотках (1250 А, 830 А, 640 А), при включении внешних резонансных полей наблюдается замедление скорости вращения МГД возмущений и последовательная остановка («запирание») МГД мод. При пониженных токах в седловых обмотках (450 А), при включении внешних резонансных полей не наблюдается замедление вращения МГД возмущений. Пороговый ток в обмотках внешних магнитных полей  $\sim 450$  А соответствует амплитуде магнитного поля внутри вакуумной камеры токамака на радиусе резонансной поверхности  $q=2$  около  $B_{e2\_co} \sim 0.5$  мТл.

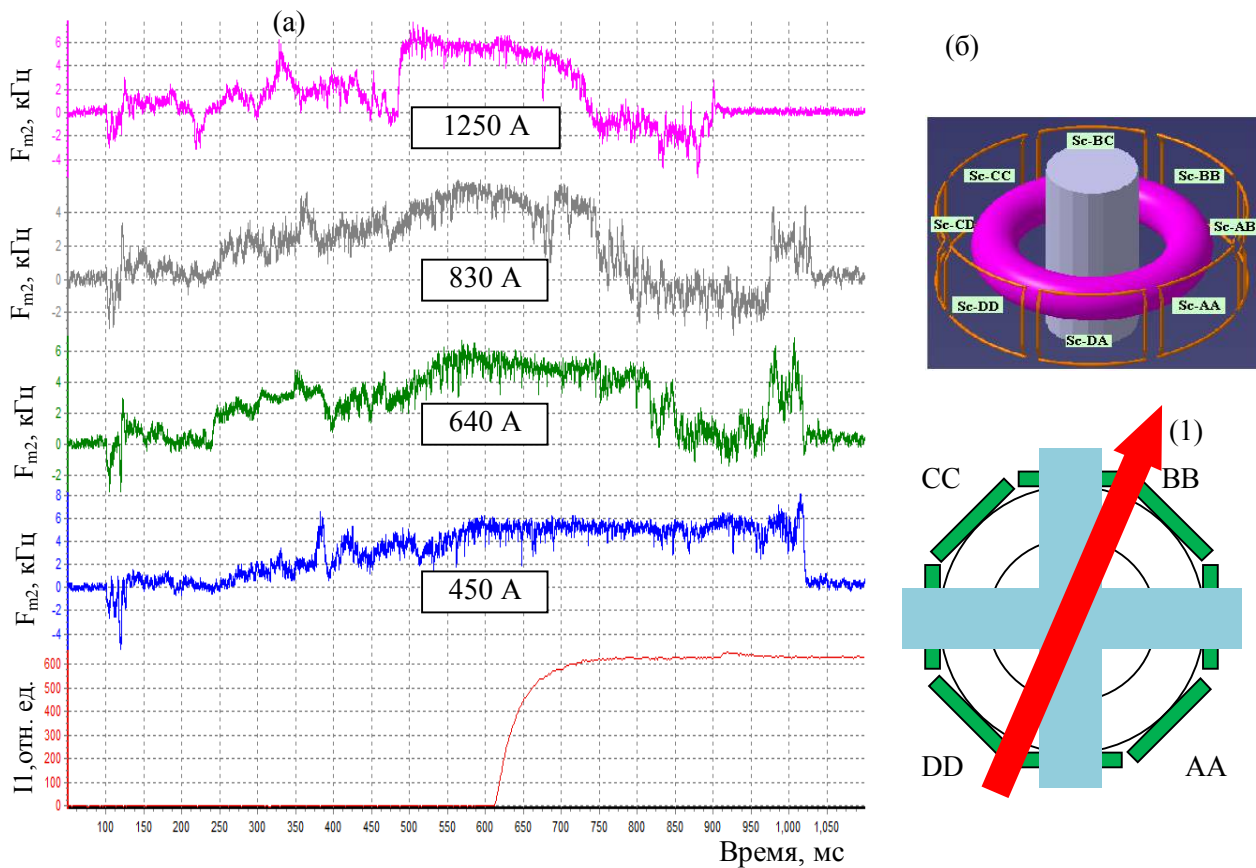


Рисунок 3. (а) Временная эволюция частоты вращения МГД возмущений  $m=2$  ( $F_{m2}$ ) в токамаке Т-10 в режимах с резонансным коэффициентом запаса устойчивости на границе  $q_a=3$  при различных значениях тока в седловых обмотках ( $I$ ). Показан также ток в седловых обмотках ( $I$ ). (б) Схематичное изображение плазменного шнура и системы седловых обмоток в токамаке Т-10. Стрелкой показано направление результирующего внешнего магнитного поля, генерируемого седловыми обмотками.

Оценка для порога дестабилизации вращения МГД мод на токамаке Т-10, сделанная в результате анализа экспериментальных данных, дала значение  $B_{th} \sim 0.75$  мТл. Порог дестабилизации в соответствии с моделью [18] зависит от частоты вращения моды и находится в согласии с аналитическими оценками и экспериментальными данными для других токамаков [19].

Определенная экспериментально амплитуда рассеянного поля токамака Т-10 оказалась равна  $B_{err} \sim 0.25$  мТл и соответствует оценкам, сделанным ранее в работах по анализу воздействия гало токов и токов замыкания на устойчивость вращения моды  $m=2, n=1$  [20].

## Заключение

1. Разработан и оборудован на токамаке Т-10 новый диагностический комплекс надтеплого и жесткого рентгеновского излучения с повышенным временным (до 10-100 мкс) и пространственным (до 2см) разрешением, состоящий из:

- многоракурсной системы регистрации надтеплого рентгеновского излучения в потоковом режиме на основе CdTe детекторов;
- системы внутрикамерных и внешних CdTe детекторов с интегрированными спектрометрическими усилителями;
- системы многоканальных сцинтилляционных LaBr<sub>3</sub> детекторов;
- системы численного спектрометрического анализа данных.

2. Исследована быстрая (до 100 мкс) эволюция энергетического распределения ускоренных электронов с энергией 0.5-10 МэВ на различных стадиях разряда Т-10. Получены следующие результаты:

- показано формирование пучков электронов с максимальной энергией 1 МэВ происходит на начальной стадии разряда за времена 5-10 мс;
- продемонстрировано подавление пучков ускоренных электронов при СВЧ нагреве плазмы на стационарной стадии разряда в токамаке Т-10;
- продемонстрирована пониженная генерация пучков ускоренных электронов в режимах с литий-содержащими покрытиями лимитеров;

3. Разработана методика предотвращения развития пучков ускоренных электронов с помощью СВЧ нагрева плазмы после теплового срыва при развитии неустойчивости срыва в режимах с высокой плотностью. Предотвращение развития пучков надтепловых электронных связано со стабилизацией вспышек МГД возмущений, созданием квазистационарных МГД мод и нагревом основной компоненты плазмы с помощью ЭЦР нагрева;

4. Для управления винтовыми МГД возмущениями плазмы на токамаке Т-10 разработана и оборудована новая система генерации квазистационарных

(длительностью до 2 сек) и импульсных (частота до 10 Гц) магнитных полей с винтовыми гармониками  $n=1-7$ ,  $m=1-3$ . Показано, что:

- эффект замедления вращения МГД мод в токамаке Т-10 проявляется наиболее отчетливо в плазменных режимах при расположении резонансной магнитной поверхности  $q \approx 3$  вблизи границы плазмы;
- скорость торможения МГД возмущений нелинейно увеличивается при превышении порогового значения амплитуды внешних магнитных полей;
- эффект торможения МГД возмущений зависит от пространственной ориентации резонансных магнитных полей;
- пороги остановки вращения МГД мод в токамаке Т-10 соответствуют винтовым гармоникам внешних полей  $m=2$ ,  $n=1$  с амплитудой 0.75 мТл при амплитуде рассеянных полей 0.25 мТл;
- система внешних резонансных магнитных полей может быть использована в дальнейшем для подавления пучков ускоренных электронов.



## Список цитируемой литературы

1. O. Motojima. The ITER project construction status// 2015 Nucl. Fusion 55 104023  
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/10/104023>
2. T.C. Hender. Chapter 3: MHD stability, operational limits and disruptions / T.C. Hender, J.C Wesley et. al. // 2007 Nucl. Fusion 47 S128 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/S03>
3. С.В. Мирнов. Физические процессы в плазме токамака // М.: Энергоатомиздат, 1983. —184 с.
4. S.Y. Wang. Prediction of density limit disruptions on the J-TEXT tokamak / S.Y. Wang, Z.Y. Chen, D.W. Huang et. al. // 2016 Plasma Phys. Control. Fusion 58 055014  
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/58/5/055014>
5. J.R. Martín-Solís. Formation and termination of runaway beams in ITER disruptions / J.R. Martín-Solís<sup>1</sup>, A. Loarte and M. Lehnen // 2017 Nucl. Fusion 57 066025  
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa6939>
6. В.С. Стрелков. Исследование излучений безэлектродного разряда в дейтерии // Физика плазмы и проблема управляемых термоядерных реакций, том 4, издательство АН СССР 1958 г.
7. V.V. Plyusnin. Study of runaway electron generation during major disruptions in JET / V.V. Plyusnin, V. Riccardo, R. Jaspers, B. Alper, V.G. Kiptily, J. Mlynar, S. Popovichev, E. de La Luna, F. Andersson and JET EFDA contributors // 2006 Nucl. Fusion 46 277  
<https://doi.org/10.1088/0029-5515/46/2/011>
8. V.P. Budaev. Tungsten melting and erosion under plasma heat load in tokamak discharges with disruptions / V.P. Budaev, Yu.V. Martynenko, .A. Grashin, R.N. Giniyatulin, I.I. Arkhipov, A.V. Karpov, P.V. Savrukhin, E.A. Shestakov et. al. // 2017 Nuclear Materials and Energy, 12, 418-422 <https://doi.org/10.1016/j.nme.2016.11.029>
9. S. Coda. Diagnostic techniques for measuring suprathreshold electron dynamics in plasmas (invited) // Review of Scientific Instruments 79, 10F501 (2008);  
<https://doi.org/10.1063/1.2966599>
10. A.E. Shevelev. Reconstruction of distribution functions of fast ions and runaway electrons in fusion plasmas using gamma-ray spectrometry with applications to ITER / A.E.

Shevelev, E.M. Khilkevitch, V.G. Kiptily, I.N. Chugunov, D.B. Gin, D.N. V.O. Doinikov, Naidenov, A. E. Litvinov, I.A. Polunovskii // 2013 Nuclear Fusion.. v.53. 123004

11. М.М. Дремин. Влияние напуска благородных газов на срыв разряда в токамаке Т-10 / М.М. Дремин, В.Г. Капралов и др.// 2012, ВАНТ, Сер. Термоядерный синтез, вып. 4

12. Ren J. Feedback stabilization of ideal kink and resistive wall modes in tokamak plasmas with negative triangularity / Ren J., Liu Y. Q., Liu Y., Medvedev S. Yu. // 2018 Nucl. Fusion 58 126017 <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aae269>

13. R. Yoshino. Runaway electrons in magnetic turbulence and runaway current termination in tokamak discharges / R. Yoshino and S. Tokuda //2000 Nucl. Fusion 40 1293 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/40/7/302>

14. P.V. Savrukhin. A study on the effects of magnetohydrodynamic perturbations on nonthermal beam formation during the current decay phase of disruptions in the T-10 tokamak / P.V. Savrukhin and E.A. Shestakov // Nucl. Fusion 55 (2015) 043016 (9pp)

15. A.M. Stefanovskii. Characteristics of discharge disruptions in the T-10 tokamak / A.M. Stefanovskii, M.M. Dremin, A.M. Kakurin et. al. // 2013 Plasma Phys. Rep. 39, 425 . <https://doi.org/10.1134/S1063780X1306010X>

16. P.V. Savrukhin. Coupling of internal  $m=1$  and  $m=2$  modes at density limit disruptions in the T-10 tokamak / P.V. Savrukhin, E.S. Lyadina, D.A. Martynov, D.A. Kislov and V.I. Poznyak // 1994 Nucl. Fusion 34 317 <https://doi.org/10.1088/0029-5515/34/3/I01>.

17. E.A. Shestakov. External resonance magnetic field control system based on the Siemens S7-400 controllers at the T-10 tokamak / E.A. Shestakov, P.V. Savrukhin and M.I. Ershova // 2018 J. Phys.: Conf. Ser. 1094 012005 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1094/1/012005>

18. П.В. Саврухин. Система внешних обмоток для генерации управляющих винтовых магнитных полей в токамаке Т-10 / П.В. Саврухин, С.В. Цаун // Препринт ИАЭ КИ ИАЭ-6129/7, Москва, 1999 г.

19. P.V. Savrukhin. Effect of helical magnetic fields on plasma stability in tokamaks / P.V. Savrukhin // August 2000, Volume 26, Issue 8, pp 633–640

20. N.V. Ivanov. Structure of the controlled halo-current magnetic field in the T-10 tokamak / N.V. Ivanov, A.M. Kakurin // Plasma Physics Reports, 2011, vol. 37, p. 28—34.